

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**  
**ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS**

**Determinación de factores de enriquecimiento e índices de geoacumulación de plomo,  
cadmio y níquel en suelos agrícolas del sector San Alfonso en Machachi**

**Disertación previa a la obtención del título de Licenciado en Ciencias Químicas con  
mención en Química Analítica**

**JOSÉ LUIS QUEVEDO CAZARES**

**Quito, 2013**



## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que la disertación de Licenciatura en Ciencias Químicas con mención en Química Analítica, del candidato José Luis Quevedo Cazares ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto puede ser presentada para la calificación correspondiente.

Fecha:

Dra. Lorena Meneses Ph.D.

*A mi hijo Sebastián, deseo que este trabajo te sirva de inspiración para alcanzar todas las metas que te propongas; de la misma manera como tú has sido el motor en mi vida que ha hecho esto posible. Siempre podrás contar conmigo, TE AMO.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador por el apoyo que se me proporcionó en materiales y reactivos a través de la Sala de Preparaciones de la Escuela de Ciencias Químicas a cargo del Ing. Alexis Arias. Gracias por toda su predisposición.

A mi Directora de Tesis, la Dra. Lorena Meneses, quién ha sido una guía a lo largo de toda la carrera, además confió en mí en el momento que más lo necesitaba.

A la Mtr. Yolanda Jibaja por su gran aporte lleno de sabiduría en este trabajo.

A la M.Sc. Wendy Heredia por proporcionarme información y darme la idea de realizar este tema de tesis.

A mi mamá por brindarme todo su amor y apoyo, a mi padre quién es un ejemplo de persona correcta y a mis hermanos por preocuparse siempre por mí.

A María y Germán por apoyarme en mis estudios.

Al Consorcio para el Desarrollo del Cantón Mejía, CODECAME, a través de sus representantes, Juan, Christian y Doris, gracias por todo su esfuerzo y compañía a lo largo de la elaboración de este proyecto de investigación, siempre pensando en el beneficio de las personas que más lo necesitan.

A la Subsecretaría de Control, Investigación y Aplicaciones Nucleares del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador por facilitarme acceso al equipo de digestión asistida por microondas del Laboratorio de Vigilancia Ambiental Radiactiva a cargo del Dr. Omar Suárez.

A la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento por permitirme el acceso al equipo de absorción atómica del área de Espectrofotometría a cargo de la Dra. Ximena Morales del Laboratorio de Control de Calidad dirigido por el Dr. Édgar Pazmiño de la Planta de Tratamiento en Bellavista.

Al Laboratorio Umwelt por prestarme los materiales para el muestreo.

A mis amigos: César, Mayckel, Geno, Nando, Pepe, Andrés, Tito, Gaby y muchos otros por ayudarme en una u otra situación para la elaboración de este trabajo, además de brindarme su apoyo incondicional y acompañarme en todo aspecto de la vida.

## TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
TABLA DE CONTENIDOS .....	vi
LISTA DE TABLAS .....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE ANEXOS .....	xiv
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	6
MARCO TEÓRICO .....	6
1.1.    EL SUELO.....	6
1.1.1.    Perfil del suelo.....	6
1.1.2.    Composición del suelo.....	8
1.1.3.    Clasificación taxonómica del suelo .....	11
1.1.4.    Propiedades fisicoquímicas más importantes de suelos agrícolas.....	12
1.2.    CHATARRA Y METALES PESADOS .....	17
1.2.1.    Clasificación de la chatarra.....	18
1.2.2.    Beneficios del reciclaje de chatarra .....	18
1.2.3.    Impactos en la salud y el medio ambiente .....	19

1.2.4.	Gestión de la chatarra .....	21
1.2.5.	Plomo, cadmio y níquel .....	24
1.3.	ANÁLISIS DE METALES PESADOS EN SUELOS .....	28
1.4.	FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO E ÍNDICES DE GEOACUMULACIÓN .....	29
1.4.1.	Factor de enriquecimiento (FE) .....	29
1.4.2.	Índice de geoacumulación (Igeo) .....	30
CAPÍTULO II.....		31
PARTE EXPERIMENTAL.....		31
2.1.	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....	31
2.2.	MUESTREO .....	32
2.2.1.	Descripción del sitio .....	34
2.2.2.	Manejo y preparación de muestras .....	37
2.3.	DETERMINACIÓN DE COLOR Y TEXTURA.....	38
2.3.1.	Fundamento .....	38
2.3.2.	Materiales y reactivos .....	40
2.3.3.	Procedimiento.....	40
2.4.	CONTENIDO DE HUMEDAD (ADAPTADO DEL MÉTODO ASTM D4959-07).....	41
2.4.1.	Fundamento .....	41
2.4.2.	Equipos .....	41
2.4.3.	Materiales y reactivos .....	41
2.4.4.	Procedimiento.....	41
2.4.5.	Cálculos .....	42



2.5.	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO	
	(ADAPTADO DEL MÉTODO EPA 9045D).....	42
2.5.1.	Fundamento .....	42
2.5.2.	Equipos .....	43
2.5.3.	Materiales y reactivos .....	43
2.5.4.	Procedimiento .....	43
2.6.	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA	
	(ADAPTADO DEL MÉTODO ASTM D2974 1988) .....	44
2.6.1.	Fundamento .....	44
2.6.2.	Equipos .....	44
2.6.3.	Materiales y reactivos .....	44
2.6.4.	Procedimiento .....	45
2.6.5.	Cálculos .....	45
2.7.	EXTRACCIÓN DE LOS METALES (Pb, Cd, Ni y Fe) A TRAVÉS	
	DE DIGESTIÓN ÁCIDA ASISTIDA POR MICROONDAS	
	(ADAPTADO DEL MÉTODO EPA 3051A).....	46
2.7.1.	Fundamento .....	46
2.7.2.	Equipos .....	46
2.7.3.	Materiales y reactivos .....	46
2.7.4.	Procedimiento .....	47
2.8.	DETERMINACIÓN DE PLOMO, CADMIO, NÍQUEL Y HIERRO	
	POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA	
	DE LLAMA (ADAPTADO DEL MÉTODO EPA 7000A) .....	48
2.8.1.	Fundamento .....	48
2.8.2.	Equipos .....	51

2.8.3.	Materiales y reactivos .....	51
2.8.4.	Procedimiento .....	51
2.8.5.	Cálculos .....	52
2.8.6.	Control de calidad.....	53
2.9.	APLICACIÓN DE TÉCNICAS GEOQUÍMICAS .....	53
2.9.1.	Cálculo del factor de enriquecimiento (FE) .....	54
2.9.2.	Cálculo del índice de geoacumulación (Igeo) .....	54
CAPÍTULO III .....		56
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		56
3.1.	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO .....	57
3.1.1.	Color y textura .....	57
3.1.2.	Humedad.....	57
3.1.3.	Potencial de Hidrógeno .....	60
3.1.4.	Materia orgánica.....	61
3.2.	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE METALES .....	63
3.2.1.	Plomo.....	63
3.2.2.	Cadmio.....	68
3.2.3.	Níquel .....	74
3.2.4.	Hierro.....	79
3.3.	RESULTADOS DE LOS FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO E ÍNDICES DE GEOACUMULACIÓN .....	84
3.3.1.	Factores de enriquecimiento de plomo .....	84
3.3.2.	Factores de enriquecimiento de cadmio .....	85
3.3.3.	Factores de enriquecimiento de níquel .....	86

3.3.4. Índices de geoacumulación de plomo.....	87
3.3.5. Índices de geoacumulación de cadmio .....	88
3.3.6. Índices de geoacumulación de níquel.....	88
CAPÍTULO IV .....	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	90
4.1. CONCLUSIONES .....	90
4.2. RECOMENDACIONES.....	93
BIBLIOGRAFÍA .....	95
ANEXOS .....	100

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición del suelo natural .....	8
Tabla 1.2. Elementos principales de la corteza terrestre .....	9
Tabla 1.3. Granulometría del suelo .....	13
Tabla 1.4. Capacidades de intercambio catiónico representativas (en mol/kg) de suelos superficiales .....	17
Tabla 1.5. Clases de factores de enriquecimiento para un metal pesado.....	29
Tabla 1.6. Clasificación de dos parámetros: clase de índice de geoacumulación y grado de contaminación.....	30
Tabla 2.1. Información básica de los puntos de muestreo .....	35
Tabla 3.1. Contenido de humedad .....	58
Tabla 3.2. Determinación de pH.....	60
Tabla 3.3. Determinación de materia orgánica.....	62
Tabla 3.4. Determinación de plomo .....	64
Tabla 3.5. Soluciones patrón para la construcción de la curva de calibración de plomo .....	66
Tabla 3.6. Porcentaje de recuperación de plomo en el patrón químico de 1,00 mg/L .....	67
Tabla 3.7. Porcentaje de recuperación de plomo en el material de referencia certificado .....	68
Tabla 3.8. Resultados de los blancos de digestión para plomo .....	68
Tabla 3.9. Determinación de cadmio.....	70
Tabla 3.10. Soluciones patrón para la construcción de la curva de calibración de cadmio.....	71

Tabla 3.11. Porcentaje de recuperación de cadmio en el patrón químico 0,10 mg/L.....	73
Tabla 3.12. Porcentaje de recuperación de cadmio en el material de referencia certificado .....	73
Tabla 3.13. Resultados de los blancos de digestión para cadmio.....	73
Tabla 3.14. Determinación de níquel.....	75
Tabla 3.15. Soluciones patrón para la construcción de la curva de calibración de níquel .....	77
Tabla 3.16. Porcentaje de recuperación de níquel en el patrón químico de 1,00 mg/L.....	78
Tabla 3.17. Porcentaje de recuperación de níquel en el material de referencia certificado .....	78
Tabla 3.18. Resultados de los blancos de digestión para níquel.....	78
Tabla 3.19. Determinación de hierro .....	80
Tabla 3.20. Soluciones patrón para la construcción de la curva de calibración de hierro .....	81
Tabla 3.21. Porcentaje de recuperación de hierro en el patrón químico de 10,0 mg/L.....	82
Tabla 3.22. Porcentaje de recuperación de hierro en el material de referencia certificado .....	83
Tabla 3.23. Resultados de los blancos de digestión para hierro .....	83
Tabla 3.24. Factores de enriquecimiento de plomo en San Alfonso .....	84
Tabla 3.25. Factores de enriquecimiento de cadmio en San Alfonso.....	85
Tabla 3.26. Factores de enriquecimiento de níquel en San Alfonso .....	86
Tabla 3.27. Índices de geoacumulación de plomo en San Alfonso .....	87
Tabla 3.28. Índices de geoacumulación de cadmio en San Alfonso .....	88
Tabla 3.29. Índices de geoacumulación de níquel en San Alfonso .....	89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Perfil del suelo.....	7
Figura 1.2. Triángulo textural del suelo (USDA) .....	13
Figura 1.3. Escoria desechada en Aloag.....	21
Figura 2.1. Esquema del desarrollo de la metodología.....	32
Figura 2.2. Mapa del sitio de muestreo .....	36
Figura 2.3. Cuarteo manual .....	37
Figura 2.4. Triángulo textural modificado para la prueba del tacto .....	39
Figura 2.5. Ley de Beer .....	49
Figura 2.6. Diagrama del funcionamiento de un equipo de Absorción Atómica de Llama .....	50
Figura 3.1. Comparación del contenido de humedad de los 10 lotes .....	59
Figura 3.2. Comparación del contenido de materia orgánica de los 10 lotes .....	63
Figura 3.3. Gradiente de distribución de plomo en suelos de San Alfonso.....	65
Figura 3.4. Curva de calibración para plomo .....	67
Figura 3.5. Gradiente de distribución de cadmio en suelos de San Alfonso .....	71
Figura 3.6. Curva de calibración para cadmio.....	72
Figura 3.7. Gradiente de distribución de níquel en suelos de San Alfonso.....	76
Figura 3.8. Curva de calibración para níquel.....	77
Figura 3.9. Gradiente de distribución de hierro en suelos de San Alfonso .....	80
Figura 3.10. Curva de calibración para hierro .....	82

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO 1 – FOTOGRAFÍAS .....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXO 2 – CONTENIDO DE HUMEDAD.....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO 3 – CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA.....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXO 4 – CONTENIDO DE PLOMO .....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO 5 – CONTENIDO DE CADMIO .....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXO 6 – CONTENIDO DE NÍQUEL .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO 7 – CONTENIDO DE HIERRO .....</b>	<b>122</b>
<b>ANEXO 8 – CERTIFICADO DEL MATERIAL DE REFERENCIA</b>	
<b>PARA SUELOS, ERA LOT: D039-540 .....</b>	<b>124</b>

## **RESUMEN**

En esta investigación se determinaron el índice de geoacumulación (Igeo) y el factor de enriquecimiento (FE) de metales pesados (plomo, cadmio y níquel) en el suelo de diez lotes de diferentes tipos de cultivos en el sector San Alfonso en la Parroquia de Machachi del Cantón Mejía, con el fin de evaluar una posible contaminación con estos elementos por influencia del almacenamiento de chatarra cercano al lugar; la chatarra se utiliza para la regeneración de materia prima en la fabricación de materiales metálicos a través de su fundición.

También se evaluó la calidad del suelo a través del análisis y discusión de resultados de color, textura, humedad, pH y materia orgánica, información que sirve para constatar la clase de suelo, la capacidad de intercambio catiónico y disponibilidad de metales pesados para los análisis.

Se compararon los resultados de la concentración de los metales con los criterios de calidad y valores máximos permisibles descritos en el TULAS (Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente del Ecuador, Libro VI, Anexo 2). Se graficaron los datos de la concentración de los metales para observar un gradiente de distribución de éstos en la zona de estudio.

Con el propósito de asegurar la calidad y confiabilidad de los resultados de los análisis de metales se aplicaron controles analíticos como: lectura de blancos, estándares y materiales



de referencia certificados, se analizaron parámetros como: linealidad y exactitud a través del coeficiente de regresión lineal y el porcentaje de recuperación respectivamente.

El 90 % de los lotes tienen una concentración de plomo sobre el criterio de calidad del TULAS de 25 mg/kg, ninguna muestra sobrepasa el valor máximo permisible de 100 mg/kg. El cadmio supera el criterio de calidad (0,5 mg/kg) en todas las muestras sin embargo ninguna sobrepasa el valor máximo de 2 mg/kg. El 10 % de los lotes superan el valor máximo de 50 mg/kg de concentración de níquel y el 90 % de los lotes tienen una concentración de níquel superior al criterio de calidad de 20 mg/kg.

En cuanto a los factores de enriquecimiento (FE), éstos indican al plomo como un contaminante moderadamente enriquecido debido a una fuente adicional a la de la roca madre. El cadmio se presenta en el 70 % de los lotes con un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico, el otro 30 % aunque se encuentran en el rango inferior, está muy cerca de pasar al mismo nivel. El origen de níquel no se ve afectado por otro tipo de fuente que no sea la de la roca madre.

Los índices de geoacumulación (Igeo) indican una contaminación moderada para plomo, extrema para cadmio y nula para níquel.

## **ABSTRACT**

This research determined the geoaccumulation index (Igeo) and the enrichment factor (EF) of heavy metals (lead, cadmium and nickel) in soil for ten lots of different types of crops in San Alfonso in the Parish of Machachi, Mejía County, in order to assess the possible contamination by these elements because of the influence of the storage of scrap near the site, the scrap is used for regeneration of raw material in the manufacture of metallic materials through its casting.

The quality of soil was evaluated by analyzing the color, texture, moisture, pH and organic matter, which serves to verify information on soil type, the cation exchange capacity and hence the availability of heavy metals for analyzes.

The results of the concentration of metals were compared with quality criteria and maximum permissible values described in TULAS (Unified Text of Secondary Environmental Legislation of the Ministry of Environment of Ecuador, Book VI, Annex 2). Data of metal concentration were plotted in order to observe their gradient distribution in the study area.

To ensure the quality and reliability of the results of metals, analytical tests were applied such as blank reading, standards and certified reference materials, were analyzed parameters such as linearity and accuracy through linear regression coefficient and the recovery percentage respectively.

90% of the batch has a lead concentration value above the quality criterion of TULAS of 25 mg/kg, no samples exceeded the maximum permissible value of 100 mg/kg. Cadmium exceeds (0.5 mg/kg) quality criterion in all samples but none exceeds the maximum permissible value of 2 mg/kg. 10% of the batch exceeds (50 mg/kg) maximum permissible value of concentration of nickel and 90% of the batch has concentration higher than quality criterion of 20 mg/kg of nickel.

For enrichment factor (FE), these indicate that lead is a moderately enriched pollutant because to an additional source of bedrock. Cadmium occurs in 70% of the batch with high enrichment and shows that there is serious pollution of anthropogenic origin, the other 30% although is in the lower range, is close to pass to the same level. The origin of nickel is not affected by other source than that of the bedrock.

Geoaccumulation indexes (I<sub>geo</sub>) indicate a moderate contamination for lead, extreme for cadmium and null for nickel.

## INTRODUCCIÓN

En el año 2008 [1], se inicia una actividad industrial en el Ecuador relacionada con la fundición de metales y el reciclaje de chatarra, ubicada en el sector San Alfonso en la Parroquia de Machachi del Cantón Mejía en la Provincia de Pichincha, aproximadamente a 14 km de la capital, Quito.

Esta zona es también muy conocida por su agricultura y ganadería. Muchos de los pobladores se dedican al cultivo de legumbres, hortalizas y tubérculos como: maíz, fréjol, zanahoria, nabo, col, acelga y papa; otros en cambio, son parte de la cadena informal de comercialización de chatarra, la cual es vendida para su recuperación en materia prima y posterior regeneración en productos metalmecánicos como: tornillos, alambres, tubos, entre otros.

La empresa responsable de la compra y fundición de chatarra es Adelca (Acería del Ecuador C.A.), la cual mantiene un depósito de desechos metálicos en San Alfonso desde el 2006. “La compañía ha instalado, con el permiso del Municipio un enorme montículo de chatarra en un área que cubre seis hectáreas; el montículo, alcanzando los 5 y 6 metros de altura, es fácilmente visible desde la carretera Panamericana en el tramo Aloag-Santo Domingo” [2].

El 16 de julio de 2009, Marcela Aguiñaga Vallejo, Ministra del Ambiente, otorgó a Adelca la licencia ambiental para la ejecución del proyecto centro de acopio de chatarra "San Alfonso", en la Resolución N° 202 del Registro Oficial N° 66. De igual manera se aprobó el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y Plan de Manejo Ambiental (PMA) para dicho proyecto, el cual fue presentado en Marzo de 2008 por Efficacitas Consultora Cia. Ltda.

La simple observación de este centro de acopio en las actuales condiciones brinda algunos aspectos a tratar. Desde el punto de vista turístico, el cúmulo de chatarra da una pésima imagen a todas las personas que transitan por la Panamericana. El valle de Machachi es la entrada a varios destinos turísticos como: la reserva ecológica Paschoa y el Bosque Protector Toachi-Pilatón, en las que se encuentran distintas especies arbóreas originales de los Andes, así como especies animales en peligro de extinción. Además existen el Parque Nacional Cotopaxi, los montes Ilinizas, Rumiñahui, entre otros.

Por otro lado, existen viviendas y cultivos de los productos antes mencionados a los alrededores del centro de acopio. Los agricultores se quejan que sus productos ya no crecen de la misma manera desde que la chatarra está ahí; aseguran que las condiciones de salubridad son pésimas. La chatarra acarrea consigo plagas y las casas han perdido su valor comercial [2].

Se presume una posible contaminación por metales pesados en suelos de San Alfonso y sus alrededores debido al almacenamiento inadecuado de chatarra en una zona agrícola,

además de la descarga directa al ecosistema de los residuos gaseosos, líquidos y sólidos resultantes de la fundición. El suelo es un recurso que está regulado por la Legislación Ambiental Ecuatoriana [3].

Ciertos metales pesados y sus compuestos derivados son especies químicas que en altas concentraciones son considerados perjudiciales para el ambiente y tóxicos para la salud humana; entre los más representativos están: plomo, cadmio y níquel.

Es normal encontrar toda clase de químicos en el suelo de la corteza terrestre como metales pesados debido a procesos de transformación de la roca madre; sin embargo, se puede hablar de una contaminación en los recursos naturales por efectos de la industrialización. Es así que existen dos clases de enriquecimiento de los elementos en la corteza terrestre, la primera corresponde a fuentes naturales originadas de la roca madre y la segunda se debe a procesos antropogénicos.

Técnicas geoquímicas como la determinación de factores de enriquecimiento (FE) e índices de geoacumulación (Igeo) sirven para imputar la fuente y el grado de contaminación, respectivamente, de los elementos en el suelo [4].

El presente estudio tiene como objetivos los siguientes: determinar un gradiente de distribución de la concentración de plomo, cadmio y níquel en el suelo de uso agrícola en

el sector de San Alfonso en Machachi, junto al centro de acopio de chatarra y compararlo con los criterios de calidad y valores máximos permisibles descritos en la Legislación Ambiental Ecuatoriana. Calcular los FE e Igeo de estos elementos para identificar el grado de contaminación del suelo y atribuir la fuente, sea ésta natural o antropogénica.

En el capítulo I se describen al suelo, como una matriz compleja con sus propiedades físicas y químicas que brindan información sobre la calidad del mismo para el cultivo, a la chatarra como fuente de contaminación de plomo, cadmio y níquel debido a una gestión inadecuada en cada una de las etapas dentro del reciclaje y una reseña sobre las técnicas de normalización geoquímica que admiten calcular los FE e Igeo.

En el capítulo II se hace referencia a la metodología utilizada. Se trabajó bajo procedimientos normalizados como los de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la Sociedad Americana para Pruebas de Materiales (ASTM International) y la Sociedad Canadiense de la Ciencia del Suelo (CSSS). Se considera necesario determinar las condiciones de la matriz como: el color, textura, humedad, pH y materia orgánica, porque aportan con datos sobre la composición y calidad del suelo e influyen en la disponibilidad de metales pesados para los análisis.

En el capítulo III se expresan los resultados en forma de tablas y gráficas que ayudan a entender la dinámica de los parámetros analizados, se puede observar la variación entre muestras y lotes.

Una vez realizada la discusión de los resultados se procede a detallar las conclusiones en el capítulo IV. Las recomendaciones generales por una parte se fundamentan en el marco teórico sobre una gestión responsable en el reciclaje de chatarra, y por otra, se refieren a la optimización de las técnicas analíticas para obtener resultados más exactos y precisos.



# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

### **1.1. EL SUELO**

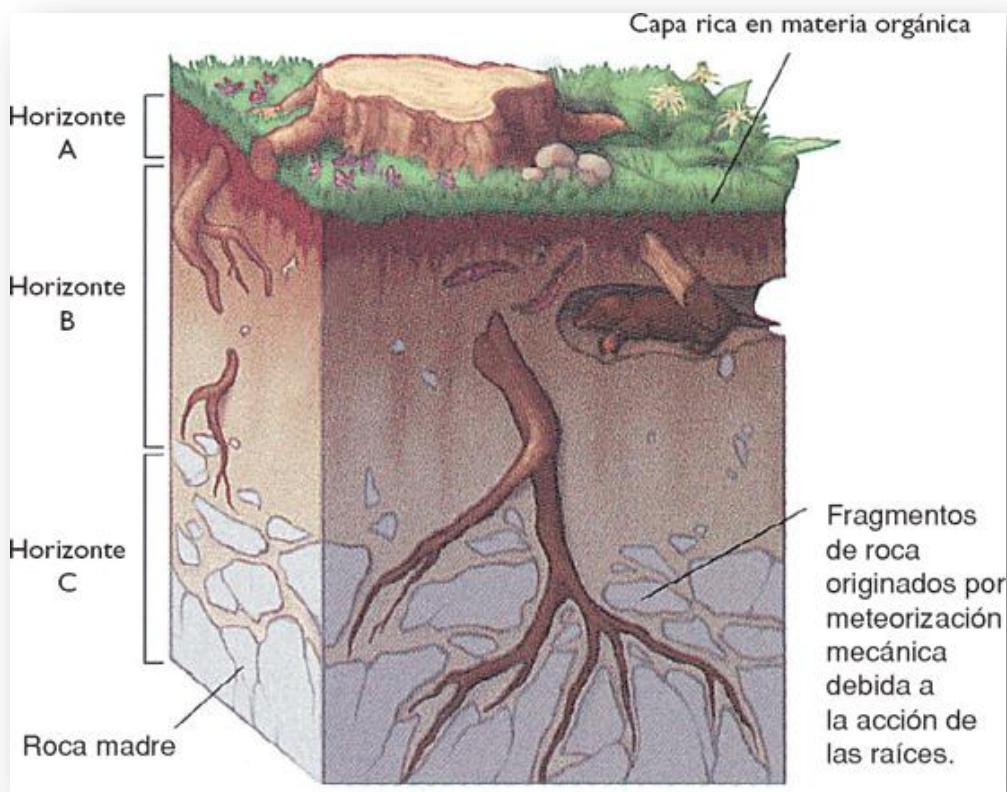
Referirse al suelo es hablar de uno de los recursos naturales más complejos del planeta, es un sistema biogeoquímico abierto con entradas y salidas; estas características lo hacen fácilmente degradable y dinámico. Desde el punto de vista químico está compuesto por minerales, materia orgánica, agua y aire.

El suelo ha tenido una serie de cambios tanto a nivel global como en cada uno de sus componentes a lo largo de la historia. La materia inorgánica y orgánica están en constante evolución, los microorganismos que lo habitan nacen y mueren, su porosidad provoca la libre entrada de aire y agua con materiales disueltos.

#### **1.1.1. Perfil del suelo**

En la Figura 1.1. se puede observar la evolución del suelo gracias a sus estratos, llamados también horizontes, que son porciones consecutivas a ciertas profundidades con propiedades físicas, químicas y biológicas completamente diferentes.

El primer estrato denominado mantillo es una capa fina de color marrón o negro compuesto principalmente por materia orgánica. El segundo estrato u horizonte “A” tiene aproximadamente 0,5 metros de profundidad, posee minerales, materia orgánica porosa y descompuesta por la acción de organismos vivos. El horizonte “B” posee mineral lixiviado proveniente de las capas superiores debido al fenómeno de percolación, de profundidad máxima de 1 metro. Por último está el horizonte “C” correspondiente a la roca madre.



**Figura 1.1. Perfil del suelo [5]**

### 1.1.2. Composición del suelo

“Un suelo natural de clima no árido, después de una lluvia y cuando ha drenado el agua, puede tener la composición aproximada que se muestra en la Tabla 1.1.” [6].

**Tabla 1.1. Composición del suelo natural [6]**

<b>Componente</b>	<b>%</b>
Aire	25
Agua	25
Materia mineral	45
Materia orgánica	5

La materia orgánica y mineral es considerada materia sólida, pero entre los poros o espacios de la materia sólida se encuentra la materia fluida (agua y aire), sin dejar de lado que hay toda una flora y fauna (algas, hongos y bacterias) que viven gracias al oxígeno del aire atrapado en el suelo. La concentración de oxígeno en el aire del suelo es menor a la concentración de oxígeno en el aire atmosférico, hecho que ocurre debido a que los microorganismos usan el oxígeno para su respiración. La presencia de oxígeno en el suelo es muy importante, porque para que un suelo sea fértil debe contener una vida microbiana activa, que aporte junto al agua y al oxígeno, a la transformación de la materia orgánica y mineral en nutrientes. Los nutrientes se disuelven en el agua y son extraídos hacia la planta desde las raíces por capilaridad.

Pero el agua no siempre está disponible para ser extraída por las raíces de la planta, cuando ésta escasea ocupa el espacio de los poros más pequeños del suelo y es fácilmente adsorbida por las sustancias higroscópicas que tienen fuerzas intermoleculares variables; éstas a la vez no permiten su absorción a través de las raíces de la planta, la cual muere por déficit de nutrientes lo que provoca que los cultivos no alcancen su potencial de productividad.

Los elementos en la corteza terrestre forman parte de algunas especies químicas, tales como: cationes, complejos orgánicos, óxidos y estructuras de redes cristalinas, pero desde un punto de vista individual son alrededor de 25 aquellos que componen la materia mineral del suelo, algunos se encuentran descritos en la Tabla 1.2., estos elementos son productos de alteraciones mecánicas y químicas provenientes de la roca madre.

**Tabla 1.2. Elementos principales de la corteza terrestre [6]**

<b>Elemento</b>	<b>%</b>
Oxígeno	46,6
Silicio	27,7
Aluminio	8,1
Hierro	5,0
Calcio	3,6
Sodio	2,8
Potasio	2,6
Magnesio	2,1
Otros	1,5

Los silicatos, cuya unidad básica está compuesta por un átomo de silicio y cuatro de oxígeno, son moléculas mayoritarias de los minerales en el suelo, en conjunto pueden llegar a formar estructuras de 3, 4 ó 6 unidades de silicio. Estos silicatos corresponden a un 75% de la materia mineral. Los electrones desapareados provenientes del oxígeno brindan al silicato una carga negativa produciendo un anión capaz de afianzarse a ciertos cationes como: sodio, potasio, calcio, magnesio, aluminio y hierro. Otros minerales importantes son los óxidos, carbonatos, sulfuros y sulfatos.

Los fragmentos de roca en la corteza terrestre pasaron por un fenómeno conocido como meteorización (ver figura 1.1.), que puede ser mecánico cuando existe un cambio en la temperatura o se expanden las raíces de la vegetación, y químico cuando intervienen el agua, el oxígeno y el dióxido de carbono en ciertas reacciones que cambian la composición de la materia.

La cinética de la transformación de estos compuestos minerales en la corteza terrestre se mide en miles o millones de años y se conoce como las etapas de meteorización de los minerales. Se tiene compuestos representativos cuya concentración domina en cada una de las etapas. La etapa original está constituida por minerales primitivos, están presentes en todos los suelos del mundo con mínima meteorización, por ejemplo en los desiertos. En la etapa intermedia sobresalen los silicatos de arcillas, se ubican en regiones templadas y son el soporte del pasto y de los árboles, son utilizados para la siembra de trigo y maíz principalmente. En la etapa avanzada existen suelos llamados tropicales constituidos por

fracciones de óxidos de arcillas, se sitúan en regiones ecuatoriales húmedas y calientes, poseen intensa meteorización y son generalizados como infértiles.

La generalización de suelos tropicales como infértiles está alejada un tanto de la realidad en algunas zonas. “El término suelos tropicales es usado como sinónimo de suelos rojos ácidos e infértiles. Es verdad que los suelos rojos, ácidos e infértiles están localizados en los trópicos, pero no todos los suelos de los trópicos, y en particular los de Ecuador tienen estas características” [7].

### **1.1.3. Clasificación taxonómica del suelo**

Esta clasificación está dada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, (USDA por sus siglas en inglés). Son doce los órdenes de suelos: Alfisoles, Andisoles, Aridisoles, Entisoles, Gelisoles, Histosoles, Inceptisoles, Mollisoles, Oxisoles, Spodosoles, Ultisoles y Vertisoles.

Las principales locaciones de producción agrícola en el Ecuador corresponden a 4 tipos de suelos de los descritos anteriormente [8]:

- Andisoles, Provincias de Chimborazo e Imbabura (Alausí y Otavalo).
- Mollisoles. Provincia de Pichincha (Machachi y Aloag).
- Entisoles. Provincia de Manabí (Portoviejo).
- Inceptisoles. Provincia del Napo (Coca y Loreto).

Según el mapa general de suelos del Ecuador [9], la zona de Machachi y gran parte de la Provincia de Pichincha corresponden a la denominación Mh1 que son suelos del Orden de los Mollisoles, de alto contenido mineral y con una superficie muy oscura, ricos en compuestos orgánicos acumulados a través del tiempo; la incorporación sistemática de los residuos vegetales y su mezcla con la parte mineral ha generado en el transcurso del tiempo un proceso de oscurecimiento del suelo, que se refleja más en la parte superficial, la que se denomina epipedón móllico. Los Mollisoles que se encuentran en un clima húmedo entre frío y templado presentan características de pH ligeramente ácido a neutro, son arenosos con limo o limosos con arena, además del incremento de arcilla en profundidad, no permanecen secos ni siquiera 90 días al año o 60 días consecutivos y son extremadamente fértiles.

#### **1.1.4. Propiedades fisicoquímicas más importantes de suelos agrícolas**

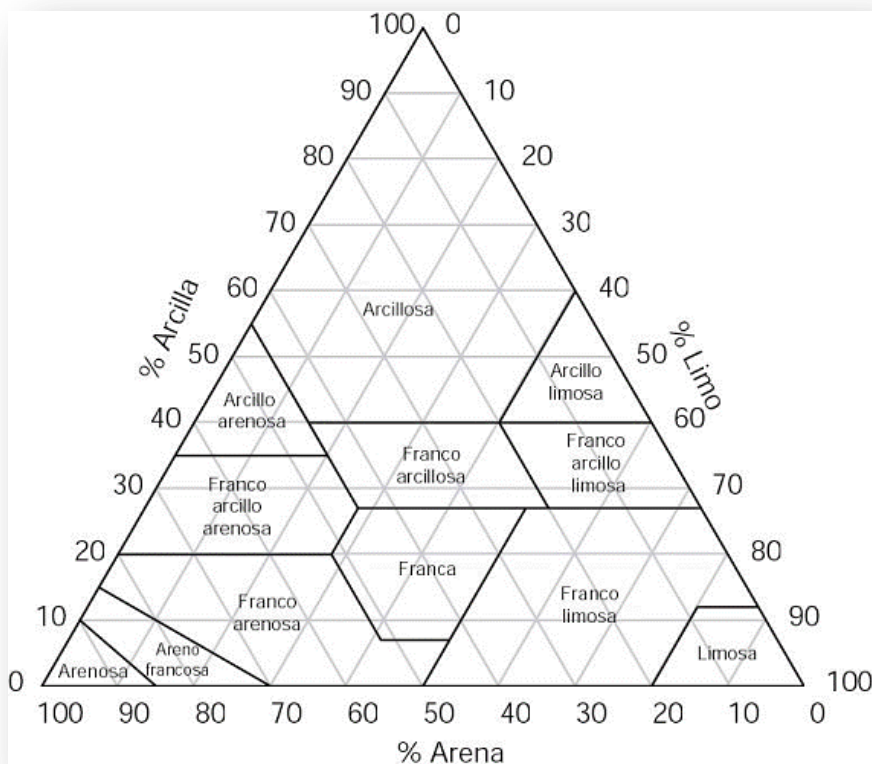
**Color.-** Los componentes del suelo determinan su color. De este modo se usa como referencia para evaluar otras propiedades. La intensidad del color varía con la cantidad de humedad. El rojo indica presencia de óxidos de hierro y manganeso; el amarillo indica óxidos de hierro hidratado; el blanco y gris, presencia de cuarzo, yeso y caolín; el negro y marrón indican materia orgánica.

**Textura.-** Las partículas del suelo tienen distintos tamaños, se las agrupa en orden en la Tabla 1.3. de acuerdo al diámetro de la partícula.

**Tabla 1.3. Granulometría del suelo**

Denominación	Granulometría	Diámetro (mm)
Grava	gruesa	> 2
Arena	media	0,05 – 2
Limo	fin	0,002 - 0,05
Arcilla	muy fina	< 0,002

Las cantidades relativas de arena, limo y arcilla determinan la textura del suelo; en la Figura 1.2. se observa las denominaciones de la textura en relación a estas cantidades.



**Figura 1.2. Triángulo textural del suelo (USDA)**



Las denominadas gredas son suelos con cantidades similares de arena, limo y arcilla, y son óptimos para la agricultura. La textura influye en la porosidad del suelo, aquellos que tienen entre un 40 a 60 % de volumen en poros permiten el desplazamiento de agua y aire al mismo tiempo que tienen una permeabilidad muy alta. La arcilla representa la fracción más activa ya que comprende la parte coloidal y mineral del suelo, desde el punto de vista químico interviene en el intercambio catiónico. La técnica del tacto es una forma sencilla y práctica para estimar la textura del suelo.

**Humedad.-** El agua toma diferentes papeles dentro de los procesos del sistema suelo: ayuda al crecimiento de las plantas, actúa como transporte para micro y macronutrientes, brinda un medio adecuado para que se produzcan procesos químicos y biológicos. Por éstas y otras razones es importante conocer la proporción del agua en el suelo. Suelos secos o áridos son considerados infértiles, aunque la fertilidad depende también de otros factores. La cantidad de agua presente está sujeta al riego periódico y a la textura del suelo [10].

**Potencial de Hidrógeno.-** Este parámetro abreviado como pH es una de las propiedades primordiales que se necesita evaluar en suelos de uso agrícola. Las plantas solo pueden absorber los nutrientes disueltos en agua, pero el grado de solubilidad de éstos cambia con la variación del pH, en otras palabras la disponibilidad de nutrientes se ve estrechamente afectada por esta propiedad. El rango óptimo de pH en el que crecen la mayoría de plantas se encuentra entre 6 y 7; es decir, suelos moderadamente ácidos y neutros son óptimos para la agricultura. De la misma forma actúan los metales pesados que son considerados contaminantes; su solubilidad en agua está regida por el pH debido a su naturaleza mineral.

**Cantidad de Materia Orgánica.-** Los residuos vegetales y animales presentes en el suelo, gracias a la acción de los microorganismos, se descomponen en celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas, grasas y ceras. Esta materia descompuesta pasa de un estado fresco a su degradación que concluye en una polimerización hasta obtener un conjunto de moléculas microscópicas que se dispersan en el agua y el suelo; este conjunto de moléculas se denomina humus y se obtiene después de un proceso químico-biológico llamado humificación. El humus es el componente de la materia orgánica más importante para los procesos de nutrición de la planta.

**Capacidad de Intercambio Catiónico.-** Tanto la superficie de las partículas del suelo como aquellas que se encuentran en solución están cargadas por iones positivos o negativos. Estos iones se encuentran en un intercambio continuo llamado “intercambio iónico” para dar lugar a un equilibrio dinámico. Las partículas del suelo que interactúan en este proceso se conocen como coloides y en su mayoría están cargadas negativamente, por lo que las especies que van a ser intercambiadas de la solución del suelo son los cationes; en este sentido se habla de un intercambio catiónico.

La importancia de este intercambio radica cuando existe una alteración del equilibrio por dos causas, la mineralización de los compuestos orgánicos o la alteración química de los minerales, lo que provoca un incremento de cationes en la solución del suelo. La única manera de restablecer el equilibrio es que parte de los cationes que se encuentran en la solución del suelo sean adsorbidos por la superficie del coloide. El proceso contrario ocurre cuando la planta consume los minerales para nutrirse, lo que ocasiona que

disminuya la concentración de cationes en la solución del suelo; para restablecer el equilibrio los coloides proporcionan los cationes que estaban adsorbidos. “En consecuencia, los coloides actúan como un almacén de sustancias nutritivas, guardándolas cuando hay abundancia y entregándolas cuando existe escasez” [6].

La determinación del número de moles o miliequivalentes de cationes absorbidos que pueden ser desorbidos en una unidad de masa de suelo seco expresa la capacidad máxima de cationes que pueden ser intercambiados (CIC), en unidades como “mol/Kg” o “meq/100 g” que son las más comunes.

En la Tabla 1.4. se observa que de un estudio de diez tipos de suelos de Estados Unidos, los Mollisoles se encuentran en el tercer lugar de aquellos que tienen una capacidad de intercambio catiónico (CIC) relativamente alta. A pesar de que el estudio tiene una connotación agronómica se puede deducir que suelos con una CIC alta y contaminados con metales pesados se convierten en excelentes portadores de estos elementos hacia las plantas y por ende hacia sus consumidores [11].

**Tabla 1.4. Capacidades de intercambio catiónico representativas (en mol/kg) de suelos superficiales [11]**

<b>Orden de suelo</b>	<b>CIC</b>	<b>Orden de Suelo</b>	<b>CIC</b>
Alfisoles	0,12 ± 0,08	Mollisoles	0,22 ± 0,10
Aridisoles	0,16 ± 0,05	Oxisoles	0,05 ± 0,03
Entisoles	0,13 ± 0,06	Spodosoles	0,11 ± 0,05
Histosoles	1,4 ± 0,3	Ultisoles	0,06 ± 0,06
Inceptisoles	0,19 ± 0,17	Vertisoles	0,37 ± 0,08

## **1.2. CHATARRA Y METALES PESADOS**

La chatarra se define como aquellos desechos metálicos que se pueden fundir para su reutilización, transformándose en materia prima para la fabricación de productos metálicos.

La acumulación y fundición de chatarra es una fuente antropogénica de contaminación de metales pesados, algunos de éstos, en concentraciones como en partes por millón (ppm), pueden afectar negativamente a los cultivos y a los consumidores de los cultivos, humanos y animales.

El reciclaje de chatarra se trata de una cadena de comercialización que comprende cuatro etapas: recolección, recuperación, transporte y regeneración, la cual presenta beneficios económicos tanto a las empresas productoras como a los comerciantes informales que intervienen en la primera y segunda etapas, pero el procesamiento de la misma sin una

gestión responsable ocasiona impactos ambientales así como la afectación a la salud humana.

#### **1.2.1. Clasificación de la chatarra**

**Chatarra generada en las plantas de fundición.-** Son aquellos productos metálicos que no cumplen con especificaciones de calidad; por ser chatarra limpia se reutiliza para ser fundida sin ningún tratamiento previo.

**Chatarra sucia.-** Es la acumulación de desechos metálicos provenientes de envases, maquinaria, electrodomésticos y materiales obsoletos como tuberías viejas, cables, baterías usadas, restos de edificios demolidos, entre otros. Casi siempre contienen residuos de aceite, pintura, etiquetas, plástico, solventes, lacas, barnices, adhesivos o soluciones. El hierro y el acero son los metales de interés de mayor porcentaje en la composición de la chatarra sucia, pero otros que se pueden recuperar son: aluminio, cobre, plomo y zinc.

#### **1.2.2. Beneficios del reciclaje de chatarra**

Los beneficios que se obtienen de esta actividad son los siguientes:

- Contribuye en gran escala a la producción mundial de productos metálicos, esto gracias a que los metales pueden regenerarse una y otra vez sin que pierdan mayormente sus propiedades fisicoquímicas.

- Los metales son recursos naturales no renovables y la producción primaria de éstos implica altos costos de inversión y consecuentemente de operación; desde un punto de vista general para la explotación de minerales se debe realizar una exploración del terreno, luego proceder a la extracción, y dependiendo del metal de interés se utilizan diferentes procesos físicos o químicos para separarlo del resto de minerales en la roca. “La producción de aluminio es un claro ejemplo en el cual la fundición secundaria genera un ahorro del 95% de la energía si se compara con la producción a partir del mineral primario, la bauxita” [12].
- La fundición secundaria de metales ayuda a evitar los posibles impactos ambientales y a la salud ocasionados por la industria minera.

### **1.2.3. Impactos en la salud y el medio ambiente**

La chatarra que se encuentra en forma de trozos o láminas no representa un alto nivel de contaminación, pero ésta se puede transformar en partículas más pequeñas y ligeras denominadas material particulado. Los principales impactos se dan cuando este material es transportado fácilmente por el aire y la lluvia, ya que arrastra consigo sustancias tóxicas como metales pesados que provienen de los electrolitos de las baterías, cañerías antiguas y aleaciones especiales para recubrimientos de acero y hierro. Otro impacto deriva del resultado de la combustión de los residuos orgánicos de los envases metálicos en presencia de productos clorados como el plástico, donde se generan subproductos como dioxinas y furanos. Estos son grupos de compuestos con alto grado de toxicidad para el ser humano.

Personas que en su mayoría son de bajos recursos económicos, recolectan la chatarra, la queman y funden a cielo abierto con el fin de limpiarla, así mismo realizan vertidos intencionales o accidentales de los líquidos que contienen los equipos obsoletos, provocando la contaminación del suelo.

Otro punto sustancial se encuentra dentro de las fábricas, en la fundición secundaria de la chatarra, las plantas instaladas sin la tecnología adecuada y sin un tratamiento de las emisiones gaseosas, incrementan la probabilidad de generar sustancias tóxicas como las expuestas anteriormente.

Dependiendo de la chatarra procesada y de las condiciones en que se realiza la fundición, la escoria remanente puede contener una variedad de contaminantes en distintas concentraciones. Esta escoria comúnmente es utilizada para el relleno de calles y terrenos en general; produciendo zonas contaminadas como se puede apreciar en la Figura 1.3.



**Figura 1.3. Escoria desechada en Aloag**

#### **1.2.4. Gestión de la chatarra**

Es imprescindible ejercer una labor responsable y eficaz en cada una de las etapas del reciclaje de la chatarra, para de alguna manera minimizar los impactos ocasionados por esta actividad.

**Recolección.-** Las personas dedicadas a la recolección son actores informales sin una regulación en su diligencia, emplean el predio de su vivienda para realizar la clasificación y limpieza de los desechos metálicos mediante el uso de prácticas inadecuadas. Para



regular esta etapa se puede tener en cuenta las siguientes políticas por parte de las fábricas y autoridades competentes:

- Trabajar conjuntamente con entidades no gubernamentales que tengan un acercamiento social para capacitar a las personas recolectoras sobre las prácticas de clasificación y limpieza de los desechos metálicos, además de los riesgos de contaminación hacia su salud y al medio ambiente, teniendo como objetivo principal el de conseguir un desarrollo sostenible.
- Exigir a las plantas procesadoras de chatarra establecer puntos estratégicos de almacenamiento donde se realice la clasificación y limpieza sin ninguna afectación a los recursos agua, suelo y aire de las zonas aledañas.
- Fomentar la venta de la chatarra únicamente a los depósitos competentes con la mínima manipulación. Conseguir que se pague el mismo precio por la chatarra sucia como por la chatarra procesada para lograr estimular a las personas a que no realicen la clasificación y limpieza en sus viviendas.
- Introducir la responsabilidad de la gestión de los residuos de productos que usan envases metálicos u otros artículos que contienen metales a los fabricantes, a través de campañas pro-ambiente por parte de asociaciones estudiantiles y organizaciones sociales.

**Recuperación.-** Esta etapa debe ser responsabilidad de las fundidoras o empresas intermediarias, debe estar a cargo de personas capacitadas y con la tecnología necesaria para realizar la recepción, clasificación, limpieza y almacenamiento de la chatarra que queda lista para la regeneración.

Los centros de acopio deben contar con todos los requisitos para no permitir la contaminación del ambiente ni la afectación a la salud del trabajador, entre estos requisitos se tiene:

- La zona debe tener piso pavimentado y techo para evitar la lixiviación de los líquidos que contenían ciertos envases.
- Personal capacitado que pueda distinguir entre los diferentes tipos de aleaciones; el uso de equipos de protección personal es indispensable, guantes, máscaras y gafas principalmente.
- Para la separación de los residuos plásticos, recubrimiento de cables y sustancias que contenían los envases, se debe prohibir la quema de la chatarra y utilizar cualquier otro medio mecánico para la extracción de estos residuos, a los que se los debe clasificar y disponer de acuerdo a las normativas u ordenanzas vigentes.

**Transporte.-** El transporte de la chatarra lista para la regeneración se debe realizar en vehículos adecuados con contenedores. Existen casos en que la chatarra es exportada, cuando esto sucede se debe realizar dentro del marco del convenio de Basilea [13].

**Regeneración.-** Básicamente consiste en la entrada de la chatarra al horno que debe trabajar bajo las condiciones adecuadas para no generar pérdidas de los metales de interés ni tampoco producir otras sustancias. La chatarra que entra debe estar limpia, los gases de combustión requieren de un sistema de enfriamiento brusco y filtros de carbón activado para evitar la formación de dioxinas y furanos o en su defecto retenerlos. Evitar o minimizar el uso de compuestos con cloro para la remoción del magnesio de las superficies y descontaminar aquellas que contenían bifenilos policlorados (PCBs, por sus siglas en inglés).

La escoria remanente y los polvos sedimentables que se obtienen de la fundición se deben recuperar en el horno o en rellenos de seguridad siempre y cuando no sobrepasen los valores máximos permisibles de metales pesados en el procedimiento de lixiviación característico de toxicidad (TCLP, por sus siglas en inglés) que describe la EPA.

#### **1.2.5. Plomo, cadmio y níquel**

Son elementos químicos considerados metales pesados por tener una densidad relativamente elevada. La abundancia del plomo en la corteza terrestre es de  $10^{-3}$  % en peso aproximadamente, mientras que la del cadmio está en el orden de  $10^{-6}$  % [14].

El níquel por otra parte es relativamente más abundante, constituye el  $8 \times 10^{-3}$  % de la corteza terrestre y se entiende que existen cantidades apreciables de este elemento en el núcleo de la Tierra [15].

El plomo es de fácil manejo y tiene alta resistencia a la corrosión, se ha convertido en uno de los metales más antiguos usados por el hombre. Entre sus principales aplicaciones en la antigüedad está la elaboración, por parte de los romanos, de vasijas y acueductos para transportar el agua. Ruinas romanas que se descubren cada cierto tiempo, demuestran el buen estado de conservación de las tuberías, tanto en los sistemas de entrada hasta sus viviendas, como en los sistemas de desagüe [16].

Hasta hace poco tiempo se seguía utilizando tuberías de plomo para el transporte del agua. Muchos años más tarde comenzó la fiebre de la fabricación de armamento en la cual el plomo hasta la actualidad es un componente mayoritario en los diferentes tipos de proyectiles.

Otros productos que se usan en la actualidad donde el plomo es constituyente en pequeñas o grandes cantidades son: baterías, pinturas a base de plomo, placas protectoras para radiación X y gamma, municiones, vidrio, cosméticos, cañerías, soldaduras para los envases de conservas, tabaco, entre otras.

El plomo puede entrar en la cadena alimenticia y producir los siguientes problemas en la salud humana:

- Perturbación de la biosíntesis de la hemoglobina y anemia.
- Incremento en la presión sanguínea.
- Daño a los riñones.
- Abortos.
- Perturbación del sistema nervioso en especial al cerebro.
- Disminución de la fertilidad masculina dañando el esperma.
- Cambios de comportamiento en los niños como agresividad, impulsividad e hipersensibilidad.

El cadmio es obtenido como subproducto de la fundición del zinc. Los usos más importantes de este elemento son los recubrimientos de superficies de hierro y acero, las baterías de níquel-cadmio y en la industria química como reactivo o pigmento. Los efectos que causa el cadmio en la salud humana son los siguientes [17]:

- Diarreas, dolor de estómago y vómitos severos.
- Probabilidad más alta de fracturas en huesos.
- Fallas en la reproducción, ocasionando problemas de infertilidad.
- Daños al sistema nervioso central.
- Reducción de la fisiología del sistema inmune.

- Desórdenes psicológicos.
- Daño del ADN y por ende de los transmisores químicos que controlan el ciclo de vida de las células, lo que produce cáncer.

Las principales aplicaciones del níquel son en aleaciones con otros metales, por ejemplo: se emplea en la fabricación del acero inoxidable, está presente en productos de joyería, en baterías recargables, recubrimientos metálicos como los utilizados en motores marinos, acuñación de monedas y en la industria química en el uso de crisoles de laboratorio. Los riesgos para la salud ante la exposición de níquel son:

- Elevadas probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata.
- Enfermedades y mareos después de la exposición al gas de níquel.
- Embolia de pulmón.
- Fallos respiratorios.
- Defectos de nacimiento.
- Asma y bronquitis crónica.
- Reacciones alérgicas, especialmente a las joyas.
- Desórdenes del corazón.

### **1.3. ANÁLISIS DE METALES PESADOS EN SUELOS**

Existen varias técnicas que permiten el análisis de metales pesados. La elección de una de ellas depende de algunos factores entre los que se puede describir: recursos económicos, disponibilidad de equipos, límites de detección requeridos, número de muestras, analitos, entre otros.

La base del análisis instrumental para metales es la absorción atómica (AA), sin embargo ésta tiene una serie de variantes que difieren en la forma de atomizar la muestra para alcanzar límites de detección más bajos (llama, horno de grafito y generación de hidruros). Otra de las técnicas que presenta una gran ventaja en comparación al tiempo de análisis es el caso de la Espectroscopía de Emisión de Plasma por Acoplamiento Inductivo (ICP).

Para todas estas técnicas es necesario que la muestra sea introducida al equipo en forma líquida, por lo que los metales deben ser extraídos de la matriz sólida; la forma convencional es a través de una digestión ácida en plancha caliente, pero este método toma alrededor de 2 horas, utiliza una cantidad de ácido considerable y se debe vigilar la solución para evitar la evaporación.

Es así que se han desarrollado técnicas más avanzadas de preparación de muestras como la introducción de radiación microonda para producir calor. Las ventajas del uso de un horno microondas constituye la reducción del tiempo de digestión (alrededor de 15 minutos), uso de menor cantidad de reactivos y por consiguiente menor producción de residuos.

## 1.4. FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO E ÍNDICES DE GEOACUMULACIÓN

### 1.4.1. Factor de enriquecimiento (FE)

En “Química Ambiental” el factor de enriquecimiento se utiliza como marco de referencia para imputar la fuente de contaminación de un elemento en el suelo y de este modo evaluar el posible impacto de origen antropogénico que la originó [4]. En este sentido se debe realizar una normalización geoquímica de los datos del metal con un elemento conservativo, entre los que se pueden considerar los más abundantes como aluminio, hierro y silicio. Muchos autores han utilizado satisfactoriamente al hierro para normalizar una contaminación de metales pesados [18].

La escala para el origen del elemento X se presenta en la Tabla 1.5.

**Tabla 1.5. Clases de factores de enriquecimiento para un metal pesado [3].**

Clases de FE	Origen del elemento X (metal pesado)
1-10	De la roca madre.
10-500	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre.
>500	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico.



#### 1.4.2. Índice de geoacumulación (I<sub>geo</sub>)

El índice de geoacumulación sirve para evaluar el grado de contaminación del suelo por sustancias orgánicas o inorgánicas. Es aplicable a metales pesados siempre y cuando se disponga de sus abundancias en la corteza terrestre, o de la concentración en un suelo de la zona que no haya tenido incidencia del hombre. Existen 6 categorías que corresponden a una clase de índice de geoacumulación con diferentes valores en intervalos que se explican en la Tabla 1.6.

**Tabla 1.6. Clasificación de dos parámetros: clase de índice de geoacumulación y grado de contaminación [4]**

Valor de I <sub>geo</sub>	Clases de I <sub>geo</sub>	Grado de contaminación
0	$I_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado

## **CAPÍTULO II**

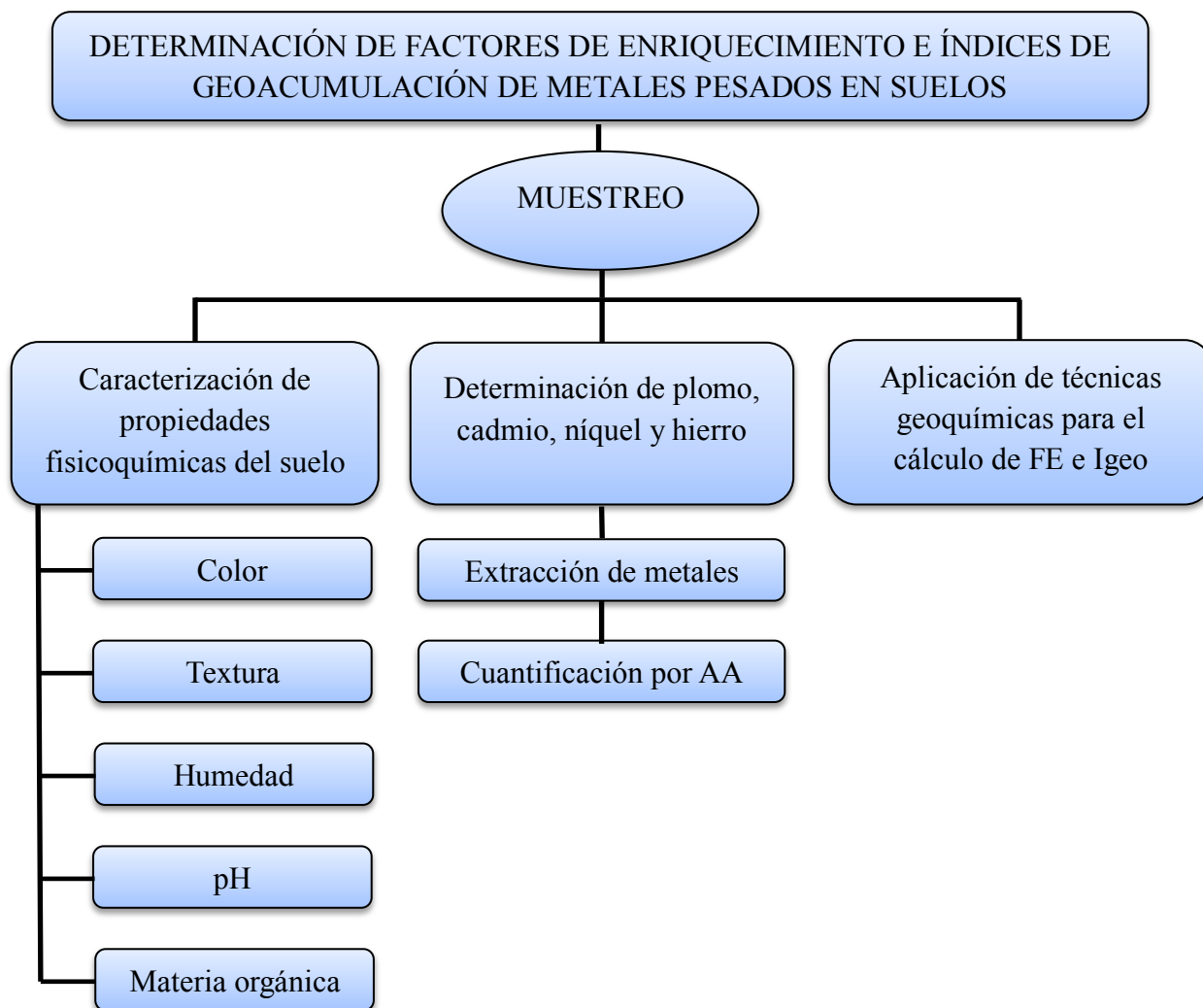
### **PARTE EXPERIMENTAL**

#### **2.1. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA**

Para satisfacer los objetivos planteados, se divide la parte experimental en 3 etapas: el muestreo contempla la primera y la más importante al momento de obtener resultados confiables, es así que las muestras del terreno de uso agrícola deben ser representativas.

La siguiente etapa se ocupa de la caracterización de las propiedades fisicoquímicas más importantes en las muestras a través de análisis de color, textura, humedad, pH y materia orgánica, información que sirve para observar la calidad y tipo de suelo.

La cuantificación en mg/kg de plomo, cadmio y níquel para la determinación de los FE e Igeo constituyen la última etapa. Para el cálculo de los “factores de enriquecimiento” es necesario determinar la concentración de hierro en todas las muestras. Una descripción de la metodología se resume en la Figura 2.1. y en el Anexo 1 se observan fotografías de los procedimientos.



**Figura 2.1. Esquema del desarrollo de la metodología**

## **2.2. MUESTREO**

La recolección, manejo y preparación de las muestras se realizó bajo procedimientos de la Sociedad Canadiense de la Ciencia del Suelo [19].

Las propiedades de todos los suelos cambian debido a variables naturales como la topografía, geología y la vegetación predominante, estos cambios también se deben a perturbaciones ambientales como deposiciones gaseosas, derrames de líquidos y la aplicación de residuos en el suelo. Propiedades como pH, materia orgánica, humedad, concentración de plomo, cadmio, níquel y hierro varían horizontalmente a través del terreno y verticalmente hacia abajo del perfil del suelo.

El suelo de uso agrícola que está junto al depósito de chatarra se encuentra dividido en lotes, cada lote tiene diferente tipo de cultivos y pertenecen a diferentes propietarios, por lo que la forma de preparar el suelo depende del propietario; además existen criaderos de animales y casas distribuidos por todo el terreno.

Por esta razón el muestreo fue de tipo aleatorio estratificado. Se muestrearon 10 lotes de área agrícola exclusiva, la superficie total aproximada es de  $5000 \text{ m}^2$ . “En sitios pequeños ( $< 0,5 \text{ ha}$ ), tan solo de 5 a 10 muestras pueden ser suficientes” [19].

Para observar la variación que existe se tomaron aleatoriamente 3 muestras de cada lote de 500 gramos aproximadamente, a una profundidad de 30 cm, lo que da un total de 30 muestras. Se analiza la varianza en base relativa a través del coeficiente de variación según la ecuación 2.1.

$$CV\% = 100 \times \frac{S}{\bar{x}} \quad (2.1)$$

Donde:      CV      =      Coeficiente de variación.

              S      =      Desviación estándar.

$\bar{x}$       =      Promedio.

El coeficiente de variación (CV) también responde a variaciones normales dadas por los errores analíticos en cada una de las mediciones de los diferentes parámetros analizados.

### **2.2.1. Descripción del sitio**

En la Tabla 2.1. se observa la información básica y las condiciones de cada uno de los puntos de muestreo.

**Tabla 2.1. Información básica de los puntos de muestreo**

<b>Lote</b>	<b>Área aproximada (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tipo de cultivo</b>	<b>Coordenadas (UTM*)</b>	<b>Uso de agroquímico</b>	<b>Altura (msnm)</b>
1	131	maíz y fréjol	771696.00 9947923.00	abono orgánico	2867
2	131	zanahoria y cilantro	771668.25 9947908.00	abono orgánico	2868
3	828	papa	771655.50 9947897.00	abono orgánico	2863
4	1005	papa	771600.00 9947875.00	abono orgánico	2863
5	851	Col blanca	771584.00 9947868.00	abono orgánico	2863
6	615	remolacha	771536.00 9947798.00	abono orgánico	2862
7	1130	perejil, zanahoria y culantro	771500.00 9947832.00	abono orgánico	2860
8	380	nabo	771487.00 9947825.00	abono orgánico	2859
9	475	col blanca y morada	771480.08 9947819.97	abono orgánico	2860
10	396	nabo y acelga	771473.08 9947811.97	abono orgánico	2860

**\*Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator** (En inglés *Universal Transverse Mercator*, **UTM**).

Las coordenadas y la altura se determinaron con un GPS marca Etrex modelo Garmin integrado con el sistema de coordenadas cartográficas mundial o DatumWGS-84. La altura promedio es de 2862 msnm y el punto céntrico de la zona de muestreo tiene las siguientes coordenadas UTM:

771605.00  
9947834.00

En la Figura 2.2. se muestra la ubicación y distribución de los puntos de muestreo dentro de una superficie agrícola afectada por la cercanía del depósito de chatarra San Alfonso.

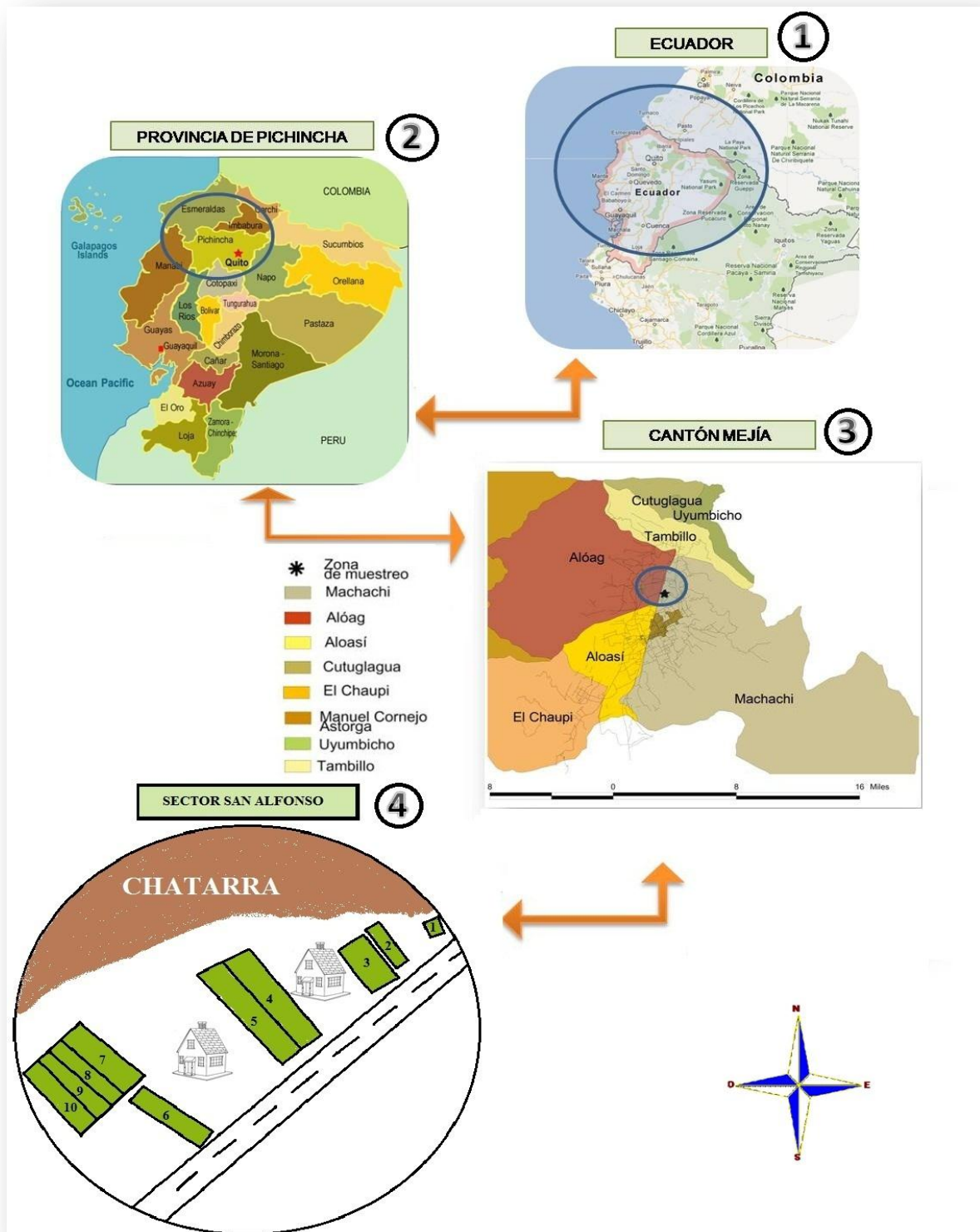
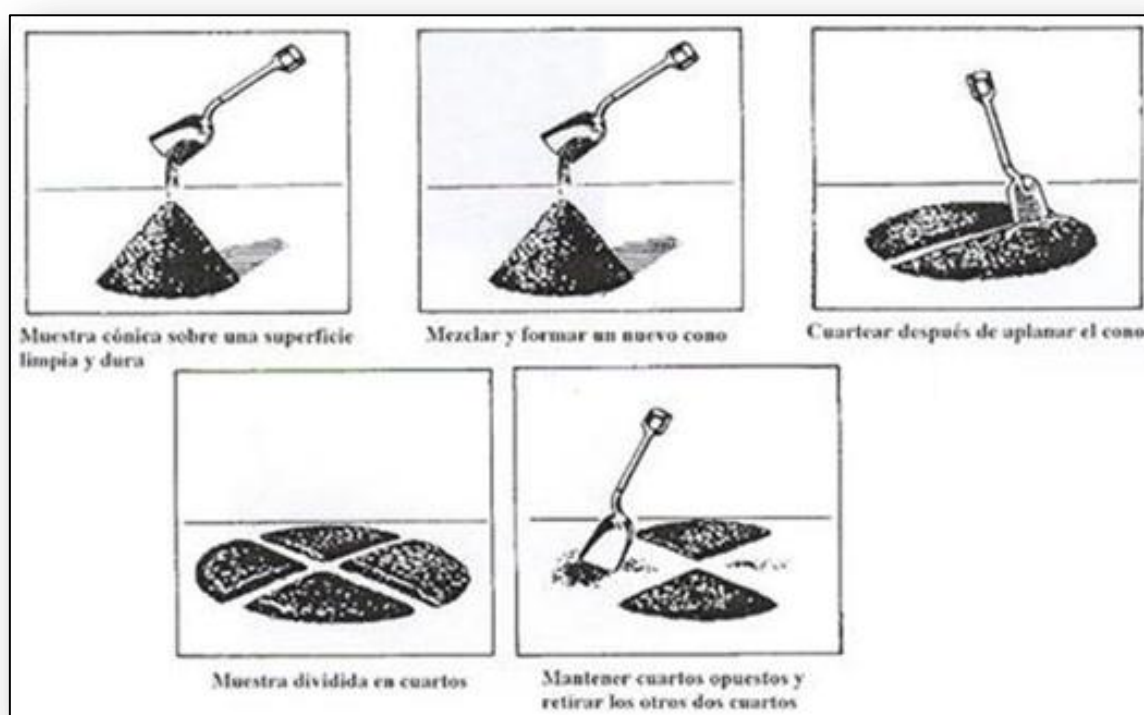


Figura 2.2. Mapa del sitio de muestreo

### 2.2.2. Manejo y preparación de muestras

El manejo y preparación de las muestras dependen considerablemente de los análisis a realizarse. Las muestras fueron transportadas y almacenadas a una temperatura de  $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$  en fundas de plástico marca Ziploc.

Llegada la muestra al laboratorio se realiza el proceso de cuarteo manual para obtener una submuestra representativa (Figura 2.3.)



**Figura 2.3. Cuarteo Manual**



Se procura que las muestras lleguen en las mismas condiciones de humedad que se encuentran en el terreno, ya que es muy probable que esta propiedad varíe conforme pasa el tiempo; por este motivo, se toma una porción para determinar la cantidad de agua. En este punto se realiza la determinación de color y textura en otra porción de suelo.

El resto de muestra pasa por un proceso de secado a temperatura ambiente durante 24 horas, luego se realiza una disminución del tamaño de partícula con la ayuda de una licuadora y posterior tamizado a través de una malla de 10 mesh (2 mm) para el resto de análisis.

## **2.3. DETERMINACIÓN DE COLOR Y TEXTURA**

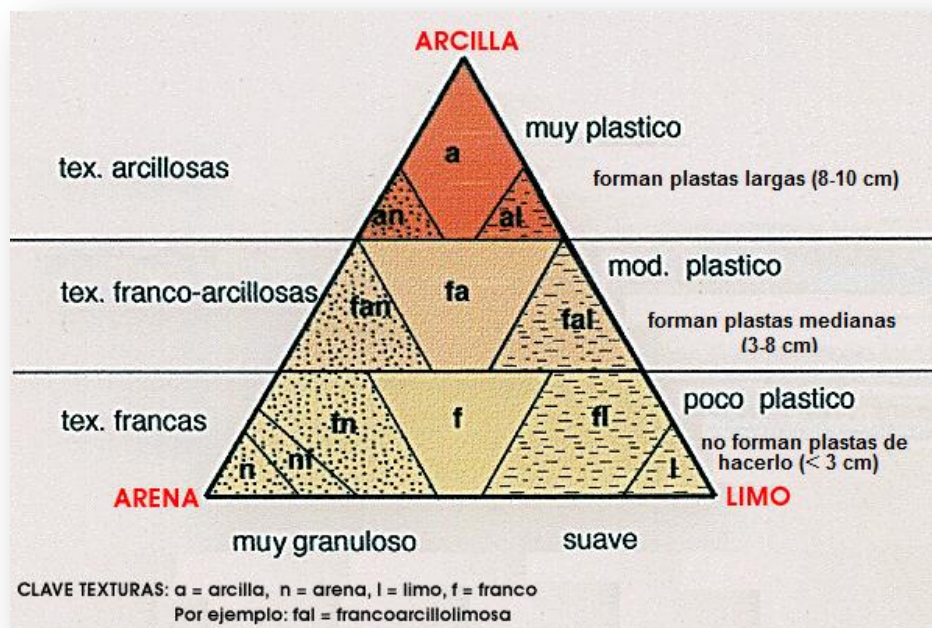
### **2.3.1. Fundamento**

El color y la textura son propiedades organolépticas con variables discretas, el ensayo de color se lo realiza por simple observación al momento de empezar a tratar las muestras cuando han llegado al laboratorio, se debe llevar un registro de aquello. Estas propiedades son de gran utilidad cuando se desea estimar otras características del suelo como su clasificación taxonómica. El color está estrechamente relacionado con la composición, mientras que la textura, con muchos otros aspectos como el grado de evolución, clasificación, procesos de formación y propiedades agrológicas.

Existen diferentes métodos para separar las porciones de los distintos tamaños de partículas que dan la textura al suelo; métodos físicos como la trituración, agitación, ultrasonido,

lavado, y cocción; métodos químicos como la oxidación con peróxido de hidrógeno, acidificación con ácido clorhídrico y dispersión de las arcillas con hexametáfosfato sódico. Sin embargo, la determinación de la textura a través del tacto y de la capacidad de formar plastas al mezclar el suelo con agua es una forma fácil y rápida de estimarla [20].

El método a través del tacto consiste en humedecer un puñado de suelo, amoldarlo, amasarlo y hacer plastas con los dedos índice y pulgar. El tamaño de la plasta y la sensibilidad de los dedos ante su aspereza o suavidad ayudan a encasillar en una de las denominaciones dentro de la Figura 2.4.



**Figura 2.4. Triángulo textural modificado para la prueba del tacto**

### **2.3.2. Materiales y Reactivos**

- Regla de 10 cm.
- Agua destilada.

### **2.3.3. Procedimiento**

- Tomar una porción de suelo y hacer una pelota humedeciéndola hasta llegar al punto donde no esté tan húmeda que tienda a quedarse pegada en la mano, ni tan seca que no se sienta tan pegajosa.
- Presionar entre el dedo pulgar e índice para formar una plasta lo más larga posible.
- Medir con la regla la longitud de la plasta.
- Determinar con ayuda de la Figura 2.4. la categoría textural del suelo entre: arcillosa, franco-arcillosa o franca, dependiendo si la plasta es larga, mediana o corta, respectivamente.
- Frotar la plasta, si se siente excepcionalmente suave, llámelo arcillo-limoso, franco-arcillo-limoso o franco limoso. Si se siente definitivamente áspero, llámelo arcillo-arenoso, franco-arcillo-arenoso o franco arenoso dependiendo del tamaño de la plasta que haya formado. Si no se siente excepcionalmente suave ni definitivamente áspero, llámelo simplemente arcilloso, franco-arcilloso o franco igualmente dependiendo del tamaño de la plasta.

## **2.4. CONTENIDO DE HUMEDAD (ADAPTADO DEL MÉTODO ASTM D4959-07)**

### **2.4.1. Fundamento**

Consiste en la determinación de agua en suelos a través del calentamiento directo de la muestra en una estufa a 105 °C hasta obtener un peso constante (método gravimétrico). Es aplicable a la mayoría de tipos de suelos [21].

### **2.4.2. Equipos**

- Estufa Memmert.
- Balanza Analítica Mettler Toledo, Mod AB204.

### **2.4.3. Materiales y Reactivos**

- Desecador provisto de un desecante coloreado, indicador de humedad (Silica gel azul).
- Cápsulas de porcelana de 75 mm x 30 mm, capacidad aproximada 50 mL.
- Espátula de acero inoxidable.
- Pinza para crisol.

### **2.4.4. Procedimiento**

- Pesar con exactitud entre 10 a 20 g de muestra fresca y homogénea en una cápsula previamente tarada, la muestra debe estar libre de interferencias como piedras grandes, ramas y raíces.
- Secar en la estufa a 105 °C mínimo 1 hora.

- Enfriar en un desecador por 30 minutos.
- Pesar nuevamente la muestra y repetir desde el calentamiento hasta obtener un peso constante.
- Calcular el contenido de humedad según la ecuación 2.3.

#### 2.4.5. Cálculos

$$\text{Peso de la muestra seca, } M_2 = \text{Peso final (g)} - \text{Peso de la cápsula (g)} \quad (2.2.)$$

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = 100 \times \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (2.3.)$$

Donde:  $M_1$  = peso inicial de la muestra húmeda (g).

$M_2$  = peso final de la muestra seca (g).

### 2.5. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO (ADAPTADO DEL MÉTODO EPA 9045D)

#### 2.5.1. Fundamento

Se trata de una medida potenciométrica de una solución acuosa extractante del ion hidronio ( $H^+$ ) del suelo. Se utiliza un electrodo de vidrio que contiene una solución saturada de cloruro de potasio, donde se encuentra una varilla de plata en una solución de cloruro de plata y por donde pasa una corriente eléctrica produciendo así una diferencia de potencial que cambia conforme varía la actividad del ion  $H^+$  presente en la solución acuosa [22].

### **2.5.2. Equipos**

- Potenciómetro Orbeco Hellige modelo pH 200.
- Electrodo de vidrio para medición de pH.
- Sensor de temperatura.
- Balanza Analítica Mettler Toledo, Mod AB204.

### **2.5.3. Materiales y Reactivos**

- Espátula con cuchara de acero inoxidable.
- Piceta.
- Papel toalla.
- Matraces de 100 mL.
- Cronómetro.
- Agua desionizada.
- Patrones Químicos de 4, 7 y 10 unidades de pH.

### **2.5.4. Procedimiento**

- Pesar 20 g de suelo en un matraz de 100 mL y agregar 20 mL de agua desionizada.
- Agitar continuamente la suspensión durante 5 minutos.
- Dejar en reposo durante 1 hora aproximadamente.
- Calibrar el potenciómetro en tres puntos de pH: 4, 7 y 10.
- Introducir el electrodo y el sensor de temperatura en la solución acuosa sin perturbar la fase sólida.
- Esperar de 1 a 2 minutos para que la señal se estabilice y tomar la medida.

- Sacar el electrodo y el sensor de temperatura, limpiarlos con agua desionizada y secarlos con papel toalla para la siguiente medición.

## **2.6. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (ADAPTADO DEL MÉTODO ASTM D2974 1988)**

### **2.6.1. Fundamento**

La determinación del contenido de materia orgánica se realiza por gravimetría, mediante una incineración en seco, que involucra la remoción de este tipo de materia por combustión de la muestra a una temperatura media (375 a 600 °C), en un horno de mufla de temperatura regulada. Las sustancias remanentes después de la ignición son cenizas que básicamente es materia mineral. Los contenedores que se sugieren para incineración son de porcelana, cuarzo o platino [23].

### **2.6.2. Equipos**

- Horno de mufla Barnsted/Thermolyne, Modelo 48000.
- Balanza Analítica Mettler Toledo, Mod AB204.

### **2.6.3. Materiales y Reactivos**

- Desecador provisto de un desecante coloreado (silicagel).
- Crisoles de porcelana de 30 mL con tapa.
- Espátula de acero inoxidable.
- Pinza para crisol.

#### 2.6.4. Procedimiento

- Pesar en un crisol de porcelana previamente tarado 2 g de suelo seco que haya permanecido en el desecador previo al análisis.
- Colocar el crisol con tapa en la mufla, gradualmente llevar la temperatura a 375 °C y mantenerla por 1 hora, luego incinerar la muestra a 600 °C por 6 horas.
- Retirar el crisol y dejarlo enfriar al ambiente por unos minutos, colocarlo en el desecador, y terminar el enfriamiento por 30 minutos.
- Pesar nuevamente la muestra y repetir el procedimiento desde la incineración a 600 °C pero esta vez por 1 hora, hasta obtener un peso constante.
- Calcular el contenido de ceniza según la ecuación 2.5. y la cantidad de materia orgánica según la ecuación 2.6.

#### 2.6.5. Cálculos

$$\text{Peso del crisol más muestra, } b = c \text{ (g)} + \text{peso de la muestra (g)} \quad (2.4.)$$

$$\text{Contenido de ceniza (\%)} = [(a - c)/(b - c)] \times 100 \quad (2.5.)$$

$$\text{Materia orgánica (\%)} = 100 - \% \text{ contenido mineral (ceniza)} \quad (2.6.)$$

Donde:        a = peso final (g) del crisol más ceniza.

                  b = peso inicial (g) del crisol más muestra.

                  c = peso del crisol vacío (g).



## **2.7. EXTRACCIÓN DE LOS METALES (Pb, Cd, Ni y Fe) A TRAVÉS DE DIGESTIÓN ÁCIDA ASISTIDA POR MICROONDAS (ADAPTADO DEL MÉTODO EPA 3051A)**

### **2.7.1. Fundamento**

La cuantificación de metales por absorción atómica (AA) requiere una matriz líquida, necesaria para ser introducida en el equipo. Se los extrae a través de una digestión ácida en caliente. El calor, que es producido por ondas microondas dentro de un horno especial para laboratorio, genera una temperatura y presión considerablemente altas en los envases que contienen la muestra y el ácido, lo que induce a una disgregación completa de la materia orgánica. El ácido reacciona con los metales y los convierte en sales inorgánicas solubles en agua [24].

### **2.7.2. Equipos**

- Horno microondas Milestone 1200.
- Balanza Analítica MettlerAE 163.
- Sorbona.

### **2.7.3. Materiales y Reactivos**

- Viales de teflón con tapa.
- Espátula con cuchara de acero inoxidable.
- Soportes universales.
- Pinzas metálicas.

- Balones aforados de 25 mL clase A.
- Embudos de filtración.
- Pipeta volumétrica de 10 mL clase A.
- Piceta
- Papel filtro cualitativo.
- Ácido nítrico concentrado calidad trace metal.
- Agua desionizada.
- Material de Referencia Certificado de metales en suelo marca ERA Lote D039540.

#### **2.7.4. Procedimiento**

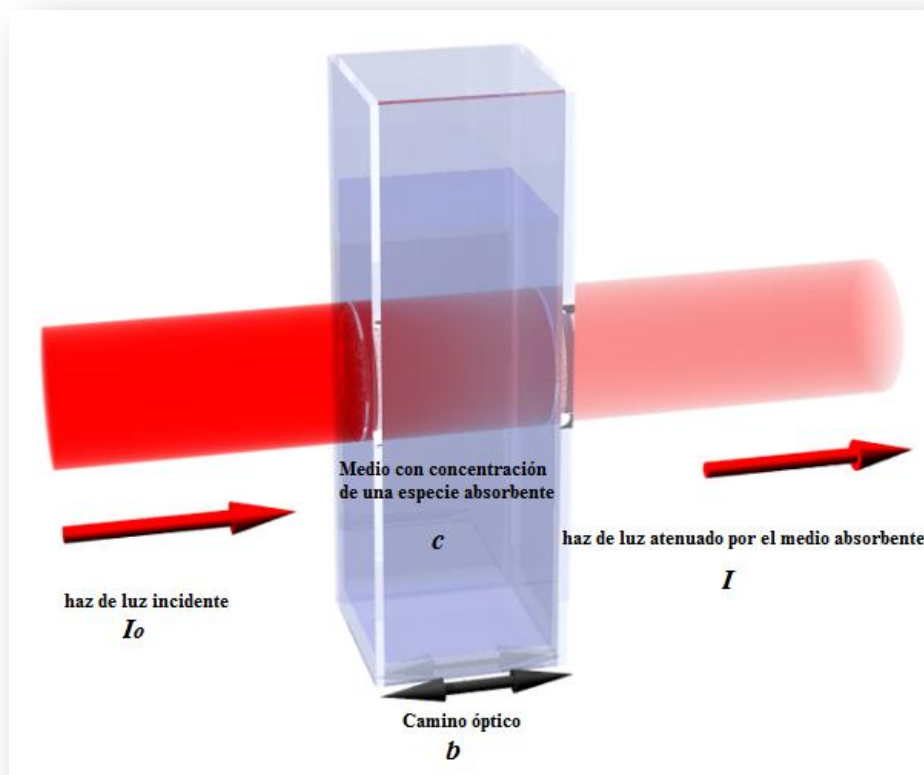
- Pesar en un vial de teflón aproximadamente 0.500 g de muestra; cada 15 muestras pesar la misma cantidad del Material de Referencia Certificado, en total 2.
- Añadir 10 mL de ácido nítrico concentrado, cada 10 muestras colocar en un vial vacío la misma cantidad de ácido que en las muestras, estos sirven de blanco, en total 3.
- Cerrar el vial y ubicarlo en el rotor de acuerdo a las especificaciones del fabricante.
- Colocar el rotor en el horno y cerrar la puerta, se debe tener en cuenta todos los procedimientos de seguridad.
- Seleccionar el método 256 (referido al método EPA 3051). El cual está programado para brindar una potencia de 700 W en 10 minutos, de esta forma se alcanza una temperatura de 175 °C y se mantiene por 10 minutos más. Al terminar la digestión se activa el sistema de ventilación para un enfriamiento acelerado, lo que disminuye el riesgo de explosión cuando se abran los viales.
- Quitar con cuidado la tapa de los viales y limpiarla con una pequeña cantidad de agua desionizada, el agua debe caer dentro del vial para no perder analito.

- Doblar y colocar papel filtro cualitativo en el embudo de filtración cuyo vástago debe estar dentro de un balón de 25 mL.
- Recuperar cuantitativamente el extracto en los balones aforados de 25 mL.
- Lavar varias veces el residuo en el papel antes que el filtrado llegue a la línea de aforo.
- Retirar el embudo y aforar con agua desionizada.

## **2.8. DETERMINACIÓN DE PLOMO, CADMIO, NÍQUEL Y HIERRO POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA DE LLAMA (ADAPTADO DEL MÉTODO EPA 7000A)**

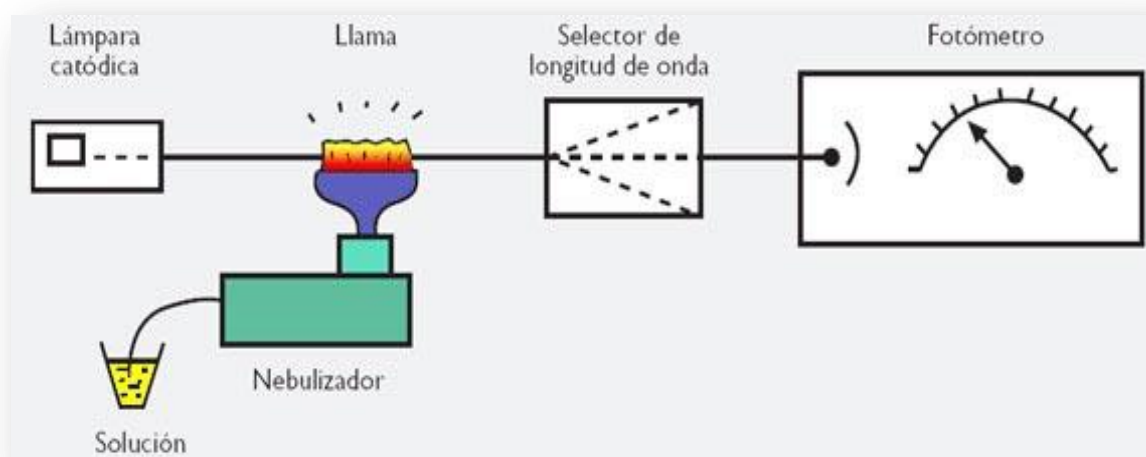
### **2.8.1. Fundamento**

Si un haz de luz, a una cierta longitud de onda, recorre una distancia  $e$  e incide sobre una muestra, la muestra absorbe parte de la radiación. Esta absorbancia es directamente proporcional al camino que recorre la luz y a la concentración de la especie química que interactúa a esa determinada longitud de onda; así lo establece la ley de Beer (Figura 2.5.) que es la base del análisis cuantitativo en espectrofotometría. “Para una radiación monocromática, la absorbancia es directamente proporcional al camino óptico  $b$  a través del medio y la concentración  $c$  de la especie absorbente” [25].



**Figura 2.5. Ley de Beer**

En absorción atómica (Figura 2.6.), la muestra es atomizada en la llama que es el medio absorbente, la radiación es producida generalmente por una lámpara de cátodo hueco, el cátodo está fabricado con el metal de interés por donde pasa una corriente eléctrica que excita sus átomos, éstos al pasar nuevamente a estado fundamental emiten su radiación característica a diferentes longitudes de onda.



**Figura 2.6. Diagrama del funcionamiento de un equipo de Absorción Atómica de Llama**

Para seleccionar la longitud de onda se debe tomar en cuenta el rango óptimo de trabajo y la concentración del analito en las soluciones digestadas, de esta forma se evita posibles errores en los resultados al diluir la muestra. La temperatura de la llama depende del elemento que se desea determinar, se utilizan diferentes combinaciones de gases y flujos entre el combustible y el oxidante. Para la determinación de Pb, Cd, Ni y Fe se usa como combustible acetileno y como oxidante aire.

Este método es rápido, sencillo y alberga un gran número de analitos. Es aplicable a suelos previa digestión ácida, donde los metales que se encuentran en solución pueden ser fácilmente determinados, también satisface los límites de detección requeridos según la tabla 1 del método 7000A de la EPA [26].

### **2.8.2. Equipos**

- Espectrofotómetro de Absorción Atómica de llama marca Varian 240 FS.
- Lámparas de cátodo hueco de Fe, Pb, Cd y Ni marca Varian.
- Interfaz de comunicación entre el espectrofotómetro y un computador provisto con el software SpectrAA.

### **2.8.3. Materiales y Reactivos**

- Pipeta graduada de 10 mL.
- Piceta
- Ácido nítrico concentrado calidad trace metal.
- Blanco de ácido nítrico diluido al 0,15 %.
- Soluciones estándar de Pb, Cd, Ni y Fe de 1000 mg/L marca Inorganic Ventures.
- Soluciones patrón de calibración preparadas a partir de las soluciones estándar.
- Soluciones de 25 mL de: muestras, blancos de digestión y materiales de referencia digestados por microondas.

### **2.8.4. Procedimiento**

- Elegir la lámpara adecuada para el análisis y dejarla calentar por 15 minutos mínimo.
- Durante este tiempo alinear el mechero con el haz de luz.
- En el software se encuentran los métodos establecidos de acuerdo a las instrucciones del fabricante en cuanto a: longitud de onda, anchura de rendija y corriente de la lámpara.

- Encender el mechero y regular los flujos de combustible y oxidante para obtener la temperatura de llama necesaria.
- Optimizar la señal de la lámpara con la solución de ácido nítrico diluido y establecer el cero de absorbancia.
- Realizar un chequeo de la sensibilidad con una solución patrón del metal de interés, como lo establece el método del software.
- Ajustar el quemador y flujo de muestra al nebulizador para obtener la sensibilidad y estabilidad deseadas, de esta forma alcanzar buena reproducibilidad en los resultados.
- Construir una curva de calibración a partir de la concentración de los patrones versus sus absorbancias.
- Aspirar las muestras y determinar su concentración a partir de la curva de calibración, el detector del equipo mide la cantidad de radiación absorbida por las muestras y el software brinda los resultados ya sea en absorbancias o directamente en concentración.

#### 2.8.5. Cálculos

$$\text{mg/kg metal en la muestra} = \frac{A \times B}{W} \quad (2.7.)$$

Donde:  $A$  = Lectura del equipo en mg/L del metal en la solución digestada.

$B$  = Volumen final de la muestra en L después de la digestión.

$W$  = Peso seco de la muestra en kg.

### 2.8.6. Control de Calidad

Una curva de calibración debe ser preparada diariamente con un mínimo de tres soluciones patrón y un blanco de ácido nítrico diluido que corresponda al cero de absorbancia. Se debe aceptar la curva cuando tenga un coeficiente de regresión lineal mayor a 0,995.

Se debe correr un patrón químico (PQ) por cada set de muestras del elemento analizado, también un Material de Referencia Certificado de suelo (MRC) por cada 15 muestras. Se acepta el PQ y el MRC al analizar el porcentaje de recuperación según la ecuación 2.8., aquel que debe estar dentro del 90 al 110 %. Además, los resultados del MRC deben estar dentro de los límites de aceptación descritos en el certificado del material de acuerdo al método EPA 3051 HNO<sub>3</sub> (Anexo 8).

$$\% \text{ Recuperación} = 100 \times \frac{A}{B} \quad (2.8.)$$

Donde:  $A$  = Valor obtenido experimentalmente.

$B$  = Valor teórico o certificado.

La lectura de blancos provenientes de la digestión se debe realizar cada 10 muestras y el valor no debe sobrepasar la concentración del primer estándar en la curva de calibración.



## 2.9. APLICACIÓN DE TÉCNICAS GEOQUÍMICAS

### 2.9.1. Cálculo del factor de enriquecimiento

Para el cálculo del FE de un elemento X se debe utilizar la ecuación 2.9. [18].

$$FE = (X/Fe)_{\text{muestra}} / (X/Fe)_{\text{corteza}} \quad (2.9.)$$

Donde:

FE = Factor de Enriquecimiento.

$(X/Fe)_{\text{muestra}}$  = Relación de la concentración (mg/kg) entre el elemento X y el hierro en la muestra.

$(X/Fe)_{\text{corteza}}$  = Relación de la concentración (mg/kg) del elemento X con respecto al hierro en la corteza terrestre.

Determinar el origen del elemento X a través de la ubicación del factor de enriquecimiento dentro de una de sus clases según la Tabla 1.5.

### 2.9.2. Cálculo del índice de geoacumulación

Se calcula a partir de la ecuación 2.10. [18].

$$I_{\text{geo}} = \log_2 C_n / 1,5 B_n \quad (2.10.)$$

Donde:

$C_n$  = Concentración del elemento X (mg/kg).

$B_n$  = Concentración geoquímica del elemento X en la corteza terrestre (mg/kg).

Determinar el grado de contaminación del suelo por el elemento X a través de la ubicación del índice de geoacumulación en una de sus clases según la Tabla 1.6.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El color y la textura corresponden a ensayos con variables discretas, por lo cual únicamente se registraron estas propiedades al momento de llegar las muestras al laboratorio.

Los ensayos de humedad, pH, materia orgánica y metales (plomo, cadmio, níquel y hierro), corresponden a medidas con variables continuas, los resultados se presentan en las Tablas 3.1., 3.2., 3.3., 3.4., 3.9., 3.14. y 3.19.

Se realizó un análisis estadístico en base al promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de cada lote; con el fin de reportar un solo resultado se ha tomado el promedio de las tres lecturas más menos la desviación estándar ( $\bar{X} \pm S$ ); mientras que el coeficiente de variación (CV) sirve para analizar la varianza en base relativa.

### **3.1. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO**

#### **3.1.1. Color y textura**

Se obtuvo como resultados un color negro y una textura franco-arcillo-limosa para el 100% de las muestras recolectadas; estas son características de los Mollisoles, por lo tanto son indicadores de que todas las muestras pertenecen al mismo tipo de suelo.

#### **3.1.2. Humedad**

Los datos y resultados del contenido de humedad en todas las muestras se encuentran tabulados en el Anexo 2. A continuación se muestra un ejemplo de los cálculos al utilizar las ecuaciones 2.2. y 2.3.

Datos:

Lote: 1	Peso final: 45,2471 g
Muestra: A	Peso de la cápsula: 37,7826 g
Peso de la muestra, $M_1$ : 10,0186 g	Peso de la muestra seca, $M_2$ : 7,4645 g

Cálculos:

$$\text{Peso de la muestra seca} = \text{Peso final (g)} - \text{Peso de la cápsula (g)} \quad (2.2.)$$

$$\text{Peso de la muestra seca} = 45,2471 \text{ g} - 37,7826 \text{ g}$$

$$\text{Peso de la muestra seca, } M_2 = 7,4645 \text{ g}$$

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = 100 \times \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (2.3.)$$

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = 100 \times \frac{10,0186 \text{ g} - 7,4645 \text{ g}}{10,0186 \text{ g}}$$

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = 25,5$$

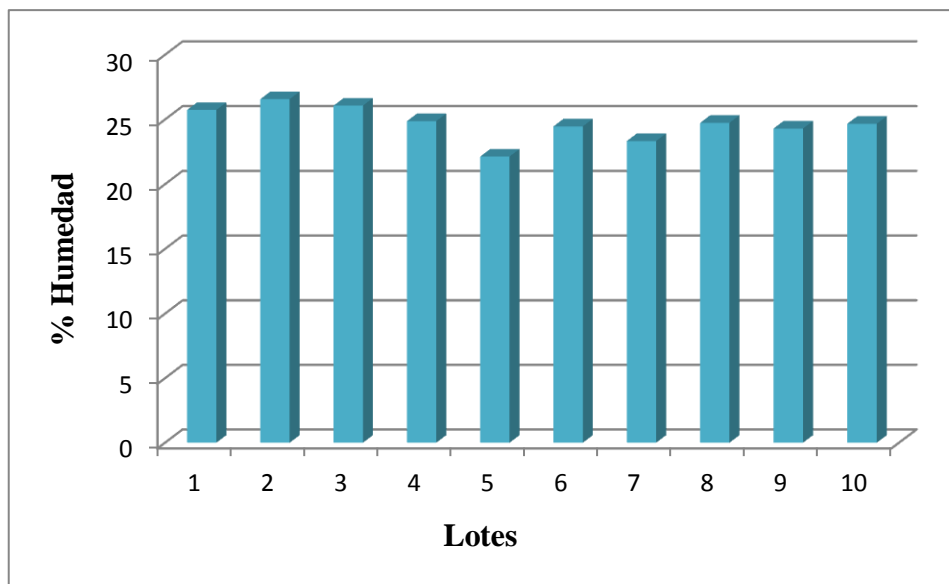
Según la Tabla 3.1., el contenido de humedad está dentro del 22,1 % (lote 5) y el 26,6 % (lote 2). La variación máxima de esta propiedad se evidencia en el lote 6 correspondiente al 3,7 %, mientras que los lotes 2, 3, 4 y 10 tienen un porcentaje de agua bastante análogo, varían solamente en el 0,8 % de acuerdo al coeficiente de variación.

**Tabla 3.1. Contenido de humedad**

Lote	Muestras			Promedio (%)	Desviación estándar (%)	% CV
	A (%)	B (%)	C (%)			
1	25,5	26,2	25,5	25,7	0,4	1,6
2	26,4	26,8	26,5	26,6	0,2	0,8
3	26,0	26,3	25,9	26,1	0,2	0,8
4	25,1	24,8	24,7	24,9	0,2	0,8
5	21,4	22,5	22,5	22,1	0,6	2,9
6	24,0	25,5	23,9	24,5	0,9	3,7
7	23,7	23,6	22,7	23,3	0,6	2,4
8	25,6	24,3	24,3	24,7	0,8	3,0
9	23,7	24,5	24,7	24,3	0,5	2,2
10	24,6	24,9	24,5	24,7	0,2	0,8

La variación está atribuida a la uniformidad y periodicidad con las que las personas riegan el suelo, además de los errores analíticos asociados a los instrumentos utilizados, las condiciones ambientales y aquellos que son propios del analista. Se acepta hasta una variación del 5 % para el contenido de humedad en suelo.

Al realizar una comparación de acuerdo a la Figura 3.1. los lotes 5, 7 y 9 son los que poseen menor cantidad de agua. El lote 5 corresponde al cultivo de col. “Es importante que en hortalizas que están compuestas en su gran mayoría por agua como la col (89,3% de humedad de la parte comestible), el terreno tenga un riego constante” [27]. Por lo tanto se debería esperar un mayor riego de agua para este lote.



**Figura 3.1. Comparación del contenido de humedad de los 10 lotes**

### 3.1.3. Potencial de Hidrógeno

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente entre 19 y 22 °C. El pH del suelo en esta zona se encuentra entre el 6,02 (lote 4) y 6,84 (lote 10) de acuerdo a la Tabla 3.2. La variación máxima se evidencia en el lote 6 con un CV de 4,1 %. Para este ensayo se acepta hasta una variación de 5 %.

**Tabla 3.2. Determinación de pH**

Lote	Muestras			Promedio*	Desviación estándar*	% CV
	A*	B*	C*			
1	6,19	6,20	6,06	6,15	0,08	1,3
2	6,53	6,43	6,70	6,55	0,14	2,1
3	6,03	6,13	6,11	6,09	0,05	0,9
4	5,89	6,18	5,98	6,02	0,15	2,5
5	6,40	6,68	6,69	6,59	0,16	2,5
6	6,71	6,71	6,24	6,55	0,27	4,1
7	6,51	6,45	6,29	6,42	0,11	1,8
8	6,72	6,77	6,79	6,76	0,04	0,5
9	6,73	6,70	6,79	6,74	0,05	0,7
10	6,89	6,82	6,80	6,84	0,05	0,7

\*Unidades de pH.

Todas las muestras se encuentran en un rango de pH de ligeramente ácido a neutro. Esta es una característica propia de los Mollisoles que se localizan en un clima húmedo entre frío y templado.

### 3.1.4. Materia orgánica

Los datos y resultados del contenido de materia orgánica en todas las muestras se encuentran tabulados en el Anexo 3. A continuación se muestra un ejemplo de los cálculos al utilizar las ecuaciones 2.4., 2.5. y 2.6.

Datos:

Lote: 2	Peso final, a: 21,6411 g
Muestra: B	Peso del crisol, c: 19,8483 g
Peso de la muestra: 1,9491 g	

Cálculos:

$$b = c \text{ (g)} + \text{peso de la muestra (g)} \quad (2.4.)$$

$$b = 19,8483 \text{ g} + 1,9491 \text{ g}$$

$$b = 21,7974 \text{ g}$$

$$\text{Contenido de ceniza (\%)} = [(a - c)/(b - c)] \times 100 \quad (2.5.)$$

$$\text{Contenido de ceniza (\%)} = [(21,6411 \text{ g} - 19,8483 \text{ g}) / (21,7974 \text{ g} - 19,8483 \text{ g})] \times 100$$

$$\text{Contenido de ceniza (\%)} = (1,7928 \text{ g} / 1,9491 \text{ g}) \times 100$$

$$\text{Contenido de ceniza (\%)} = 92,0$$

$$\text{Materia orgánica (\%)} = 100 - \% \text{ contenido mineral (ceniza)} \quad (2.6.)$$

$$\text{Materia orgánica (\%)} = 100 - 92,0$$

$$\text{Materia orgánica (\%)} = 8,0$$



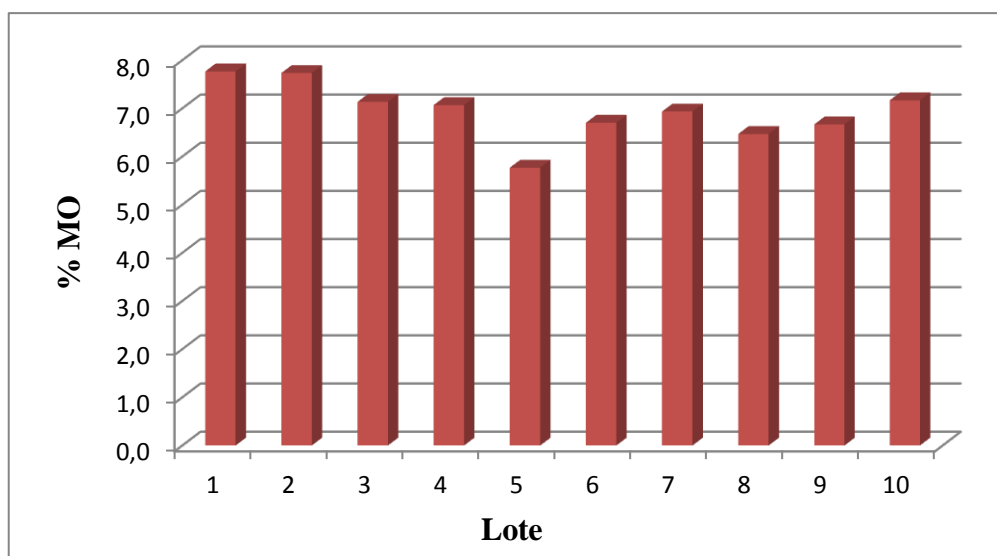
El contenido de materia orgánica varía desde el 5,8 % (lote 5) al 7,8 % (lote 1), según la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Determinación de materia orgánica**

Lote	Muestras			Promedio (%)	Desviación estándar (%)	% CV
	A (%)	B (%)	C (%)			
1	7,8	7,6	7,9	7,8	0,2	2,0
2	7,5	8,0	7,7	7,7	0,3	3,3
3	7,0	7,2	7,2	7,1	0,1	1,6
4	7,0	7,1	7,1	7,1	0,1	0,8
5	5,8	5,9	5,6	5,8	0,2	2,6
6	6,6	6,5	7,0	6,7	0,3	3,9
7	6,9	7,0	6,9	6,9	0,1	0,8
8	6,3	6,5	6,6	6,5	0,2	2,4
9	6,9	6,4	6,7	6,7	0,3	3,8
10	7,0	7,3	7,2	7,2	0,2	2,1

El lote 6 presenta un CV de 3,9 % que es el más alto; se atribuye la variación entre muestras a la adición de abono orgánico de diferentes tipos como guano y estiércol en distintas cantidades por parte de las personas que preparan el suelo. Para este ensayo se acepta una variación de hasta el 5 %.

De acuerdo a la Figura 3.2., el porcentaje de materia orgánica tiende a disminuir conforme se va alejando del primer lote hasta llegar al quinto lote, luego empieza nuevamente a subir manteniéndose un poco más estable.



**Figura 3.2. Comparación del contenido de materia orgánica de los 10 lotes**

En el lote 5 el tipo de cultivo para el cual se prepara este suelo es col blanca, un **alimento** con un gran contenido de **agua y minerales que absorbe del sustrato**, lo que lo convierte en un vegetal con un bajo contenido calórico, **26 kcal/100g de alimento** [27]. Lo que incide al observar que el terreno tiene los resultados de humedad y materia orgánica más bajos de los diez lotes.

## **3.2. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE METALES**

### **3.2.1. Plomo**

Las lecturas del equipo y los resultados se encuentran tabulados en el Anexo 4. A continuación se muestra un ejemplo de los cálculos al utilizar la ecuación 2.7.

Datos:

Lote: 3

Lectura del equipo, A: 0,567 mg/L

Muestra: C

Volumen de aforo,  $B$ : 0,025 L

Peso de la muestra,  $W$ :  $5,018 \times 10^{-4}$  kg

Cálculos:

$$\text{mg/kg de plomo en la muestra} = \frac{A \times B}{W} \quad (2.7.)$$

$$\text{mg/kg de plomo en la muestra} = \frac{0,567 \text{ mg/L} \times 0,025 \text{ L}}{5,018 \times 10^{-4} \text{ kg}}$$

$$\text{mg/kg de plomo} = 28,25$$

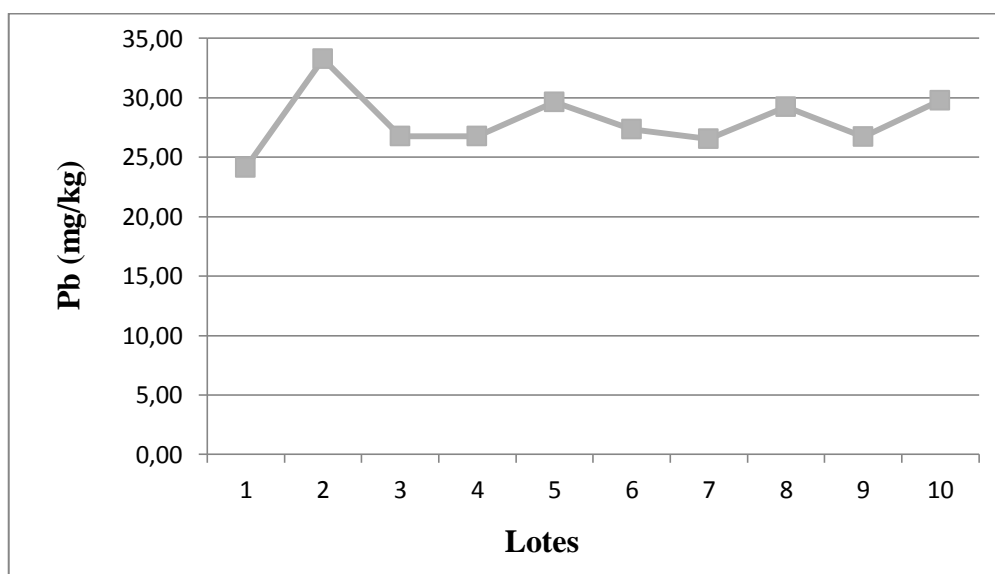
De acuerdo a la Tabla 3.4., el contenido de plomo está en el rango de 24,09 mg/kg (lote 1) y 33,28 mg/kg (lote 2). La variación máxima se observa en el lote 2 con un CV de 24,4 %. Las lecturas del equipo están en concentraciones menores a 1 mg/L (ppm) como se observa en el Anexo 4, por lo que según la trompeta de Horwitz se considera una variación aproximada de hasta 30 % normal [28].

**Tabla 3.4. Determinación de plomo**

Lote	Muestras			Promedio (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)	%CV
	A (mg/kg)	B (mg/kg)	C (mg/kg)			
1	25,69	19,86	26,72	24,09	3,70	15,4
2	27,06	30,30	42,49	33,28	8,13	24,4
3	25,95	26,13	28,25	26,78	1,28	4,8
4	26,74	25,67	27,87	26,76	1,10	4,1
5	31,56	28,50	28,81	29,62	1,69	5,7
6	25,62	28,37	28,06	27,35	1,51	5,5
7	26,31	25,83	27,48	26,54	0,85	3,2
8	25,68	27,14	34,89	29,24	4,95	16,9
9	25,77	26,78	27,59	26,71	0,91	3,4
10	32,70	28,23	28,38	29,77	2,54	8,5

El 90% de los lotes sobrepasan los 25 mg/kg, que es el criterio de calidad para plomo como contaminante en un suelo que refleja variaciones geológicas naturales y que se encuentra libre de la influencia de actividades industriales o urbanas generalizadas. Sin embargo, éstos no sobrepasan los 100 mg/kg que es el valor máximo permisible para suelos de uso agrícola, que se encuentran contaminados y que deben entrar a un proceso de remediación o restauración [3].

En la Figura 3.3., se observa un gradiente de concentración aproximadamente constante para plomo.



**Figura 3.3. Gradiente de distribución de plomo en suelos de San Alfonso**

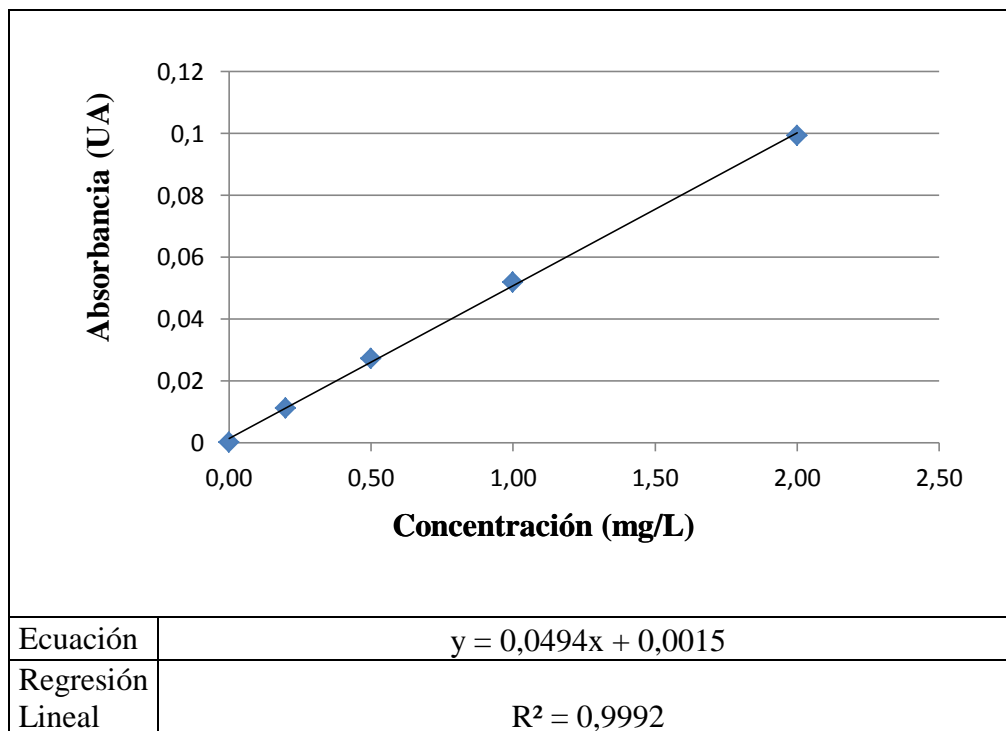
Se realizaron algunos controles de calidad para garantizar los resultados de las determinaciones de metales pesados. A continuación se exponen los concernientes a la determinación de Pb:

**Curva de calibración.-** Es una relación entre la concentración de las soluciones patrón y la absorbancia que éstas presentan. Por tratarse de una función lineal, ésta se puede evaluar a través del coeficiente de regresión lineal,  $R^2$ . En la Tabla 3.5. se exponen las soluciones utilizadas: un blanco de ácido nítrico diluido al 0,15 % y soluciones estándar de concentración conocida.

**Tabla 3.5. Soluciones patrón para la construcción de la curva de calibración de plomo**

<b>Solución Patrón</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Absorbancia (UA)</b>
blanco	0,00	0,0002
1	0,20	0,0112
2	0,50	0,0274
3	1,00	0,0519
4	2,00	0,0994

En la Figura 3.4. se observa gráficamente la curva de calibración con su ecuación y coeficiente de regresión lineal.



**Figura 3.4. Curva de calibración para plomo**

**Porcentaje de recuperación de PQ y MRC.-** Se debe calcular el porcentaje de recuperación según la ecuación 2.8., los límites comprendidos entre el 90 y 110 % se detallan en las Tablas 3.6. y 3.7.; además, en la Tabla 3.7. se detallan también los límites establecidos por el certificado del material de referencia (PALs).

**Tabla 3.6. Porcentaje de recuperación de plomo en el patrón químico de 1,00 mg/L**

A (mg/L)	B (mg/L)	Porcentaje de recuperación (%)	90 - 110 % (mg/L)	Criterio de aceptación
1,00	0,99	99	0,90 - 1,10	Aprobado

A= Valor teórico, B= Valor experimental

**Tabla 3.7. Porcentaje de recuperación de plomo en el material de referencia certificado**

Repeticiones	A (mg/kg)	B (mg/kg)	Porcentaje de Recuperación (%)	90 - 110 % (mg/kg)	PALs (mg/kg)	Criterio de aceptación
1	77,2	84,0	109	69,5 - 84,9	60,7 - 93,7	Aprobado
2	77,2	81,7	106	69,5 - 84,9	60,7 - 93,8	Aprobado

A= Valor certificado Method 3051 HNO<sub>3</sub> (Anexo 8), B= Valor experimental

PALs = The Performance Acceptance Limits, Method 3051 HNO<sub>3</sub> (Anexo 8)

**Blancos de digestión.-** Son los controles provenientes de las soluciones usadas para la digestión y que han pasado por todo el proceso desde su colocación en los viales de hasta la lectura en el equipo de absorción atómica como muestras comunes. En la Tabla 3.8., se describe los resultados para los blancos de digestión.

**Tabla 3.8. Resultados de los blancos de digestión para plomo**

Repeticiones	Resultado (mg/L)	Criterio de aceptación
1	< 0,20	Aprobado
2	< 0,20	Aprobado
3	< 0,20	Aprobado

### 3.2.2. Cadmio

Las lecturas del equipo y los resultados se encuentran tabulados en el Anexo 5. A continuación se muestra un ejemplo de los cálculos al utilizar la ecuación 2.7.

Datos:

Lote: 5

Lectura del equipo,  $A$ : 0,029 mg/L

Muestra: A

Volumen de aforo,  $B$ : 0,025 L

Peso de la muestra,  $W$ :  $5,093 \times 10^{-4}$  kg

Cálculos:

$$\text{mg/kg de cadmio en la muestra} = \frac{A \times B}{W} \quad (2.7.)$$

$$\text{mg/kg de cadmio en la muestra} = \frac{0,029 \text{ mg/L} \times 0,025 \text{ L}}{5,093 \times 10^{-4} \text{ kg}}$$

$$\text{mg/kg de cadmio} = 1,42$$

La concentración de Cd en el suelo de San Alfonso se encuentra en un rango entre 1,23 mg/kg (lote 1) y 1,46 mg/kg (lote 2), como se indica en la Tabla 3.9.

Al comparar los resultados con los valores establecidos en las tablas 1 y 2 del TULAS [3], todas las muestras sobrepasan el criterio de calidad correspondiente a 0,5 mg/kg de cadmio en un suelo no influenciado por actividades industriales. Sin embargo, no sobrepasan los 2 mg/kg, valor máximo permisible para suelos contaminados que requieren remediación.

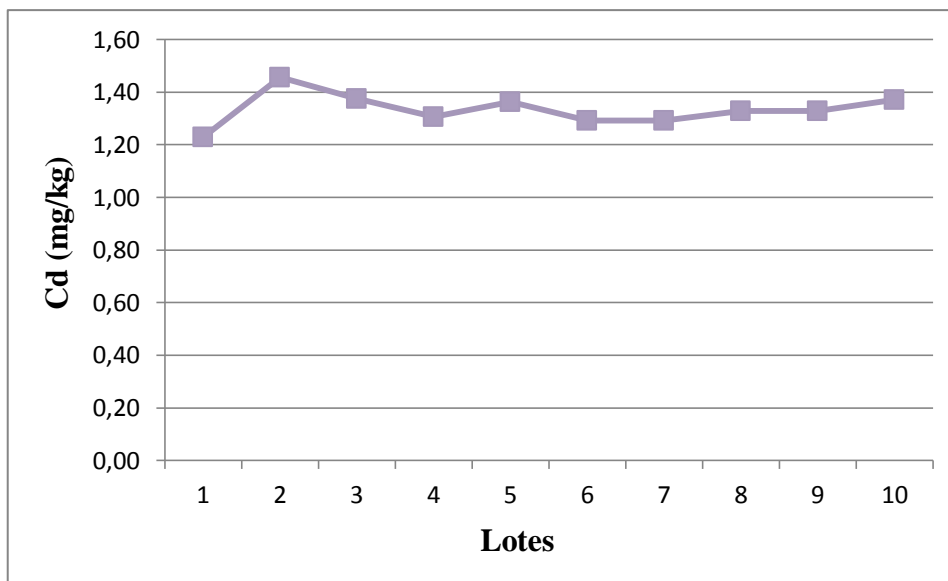


**Tabla 3.9. Determinación de Cadmio**

Lote	Muestras			Promedio (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)	% CV
	A (mg/kg)	B (mg/kg)	C (mg/kg)			
1	1,28	0,98	1,42	1,23	0,22	18,2
2	1,34	1,51	1,52	1,46	0,10	7,0
3	1,29	1,34	1,49	1,38	0,11	7,7
4	1,24	1,23	1,45	1,31	0,12	9,2
5	1,42	1,32	1,34	1,36	0,05	3,9
6	1,25	1,28	1,35	1,29	0,05	4,0
7	1,26	1,27	1,34	1,29	0,05	3,5
8	1,27	1,33	1,39	1,33	0,06	4,4
9	1,26	1,33	1,39	1,33	0,07	5,2
10	1,32	1,39	1,40	1,37	0,04	3,0

Se observa la más alta variación (18%) en el lote 1. Se acepta un CV de hasta 30 % para la determinación de cadmio ya que las lecturas del equipo (Anexo 5) son menores a 1 mg/L (ppm) [28].

En la Figura 3.5. se observa el gradiente de distribución de cadmio, aquel que es muy homogéneo, bastante parecido al de plomo.



**Figura 3.5. Gradiente de distribución de cadmio en suelos de San Alfonso**

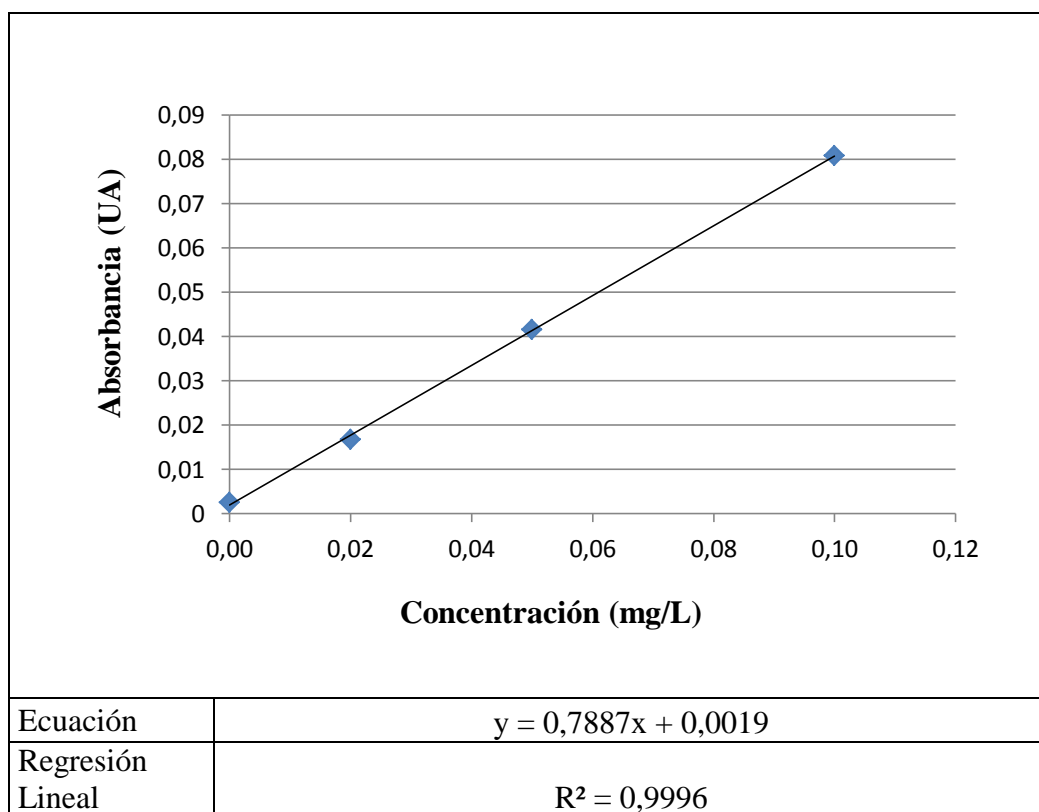
A continuación se exhiben los resultados de los controles de calidad a los que se sometió la determinación de cadmio:

**Curva de calibración.-** Para la construcción de la curva se utilizaron 3 soluciones patrón y un blanco de ácido nítrico 0.15 % que se detallan en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10. Soluciones patrón para la construcción de la curva de calibración de cadmio**

Solución Patrón	Concentración (mg/L)	Absorbancia (UA)
blanco	0,000	0,0025
1	0,020	0,0167
2	0,050	0,0416
3	0,100	0,0808

En la Figura 3.6., se observa gráficamente la curva de calibración con su ecuación y coeficiente de regresión lineal.



**Figura 3.6. Curva de calibración para cadmio**

**Porcentaje de recuperación de PQ y MRC.-** Se debe calcular el porcentaje de recuperación según la ecuación 2.8., los límites comprendidos entre el 90 y 110 % se detallan en las Tablas 3.11. y 3.12.; además, en la Tabla 3.12. se detallan también los límites establecidos por el certificado del material de referencia, (PALs).

**Tabla 3.11. Porcentaje de recuperación de cadmio en el patrón químico de 0,10 mg/L**

A (mg/L)	B (mg/L)	Porcentaje de recuperación (%)	90 - 110 % (mg/L)	Criterio de aceptación
0,100	0,099	99	0,090 - 0,110	Aprobado

A= Valor teórico, B= Valor experimental

**Tabla 3.12. Porcentaje de recuperación de cadmio en el material de referencia certificado**

Repeticiones	A (mg/kg)	B (mg/kg)	Porcentaje de Recuperación (%)	90 - 110 % (mg/kg)	PALs (mg/kg)	Criterio de aceptación
1	255	253.54	99	229,5 - 280,5	209 - 301	Aprobado
2	255	248.08	97	229,5 - 280,5	209 - 301	Aprobado

A = Valor certificado Method 3051 HNO<sub>3</sub> (Anexo 8), B= Valor experimental

PALs = The Performance Acceptance Limits, Method 3051 HNO<sub>3</sub> (Anexo 8)

**Blancos de digestión.-** En la Tabla 3.13., se presentan los resultados para los blancos de digestión en las lecturas de cadmio.

**Tabla 3.13. Resultados de los blancos de digestión para cadmio**

Repeticiones	Resultado (mg/L)	Criterio de aceptación
1	< 0,02	Aprobado
2	< 0,02	Aprobado
3	< 0,02	Aprobado

### 3.2.3. Níquel

Las lecturas del equipo y los resultados se encuentran tabulados en el Anexo 6. A continuación se muestra un ejemplo de los cálculos al utilizar la ecuación 2.7.

Datos:

Lote: 7

Lectura del equipo, A: 0,651 mg/L

Muestra: B

Volumen de aforo,  $B$ : 0,025 L

Peso de la muestra,  $W$ :  $5,111 \times 10^{-4}$  kg

Cálculos:

$$\text{mg/kg de níquel en la muestra} = \frac{A \times B}{W} \quad (2.7.)$$

$$\text{mg/kg de níquel en la muestra} = \frac{0,651 \text{ mg/L} \times 0,025 \text{ L}}{5,111 \times 10^{-4} \text{ kg}}$$

mg/kg de níquel = 31,84

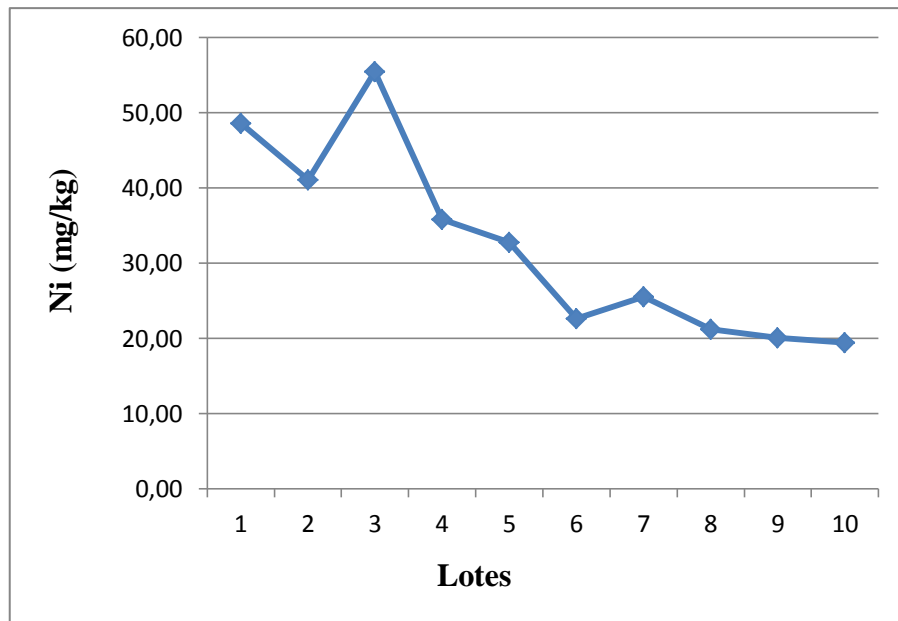
Los resultados están expuestos en la Tabla 3.14. El valor de concentración mínimo de Ni se encuentra en el lote 10 y corresponde a 19,41 mg/kg; mientras que en el lote 3 se encuentra la mayor cantidad de este elemento, 55,47 mg/kg. La variación máxima se evidencia en el lote 2 con un CV de 35,2 %. Se considera normal una variación del 30 % para la determinación de níquel [28].

**Tabla 3.14. Determinación de Níquel**

Lote	Muestras			Promedio (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)	%CV
	A (mg/kg)	B (mg/kg)	C (mg/kg)			
1	54,77	55,84	35,20	48,61	11,62	23,9
2	55,16	26,27	41,70	41,04	14,46	35,2
3	48,52	60,39	57,49	55,47	6,19	11,2
4	27,98	35,57	43,83	35,79	7,92	22,1
5	36,82	31,39	30,05	32,75	3,58	10,9
6	20,68	21,05	26,06	22,60	3,01	13,3
7	21,17	31,84	23,65	25,55	5,59	21,9
8	22,21	20,16	21,21	21,19	1,02	4,8
9	19,44	20,95	19,77	20,05	0,79	4,0
10	19,71	21,37	17,16	19,41	2,12	10,9

El 90 % de los lotes sobrepasan los 20 mg/kg (criterio de calidad) de níquel en suelos y el 10 %, los 50 mg/kg (valor máximo permisible) de níquel en suelos de uso agrícola que requieren remediación según la Legislación Ambiental Ecuatoriana; es decir, el lote 3 requeriría remediación [3].

En la Figura 3.7. se muestra el gradiente de distribución de níquel en la zona de San Alfonso, se observa una tendencia descendente a partir del lote 4. La causa posible corresponde a que los tres primeros lotes se encuentran más cerca de la chatarra como se observa en la Figura 2.2.



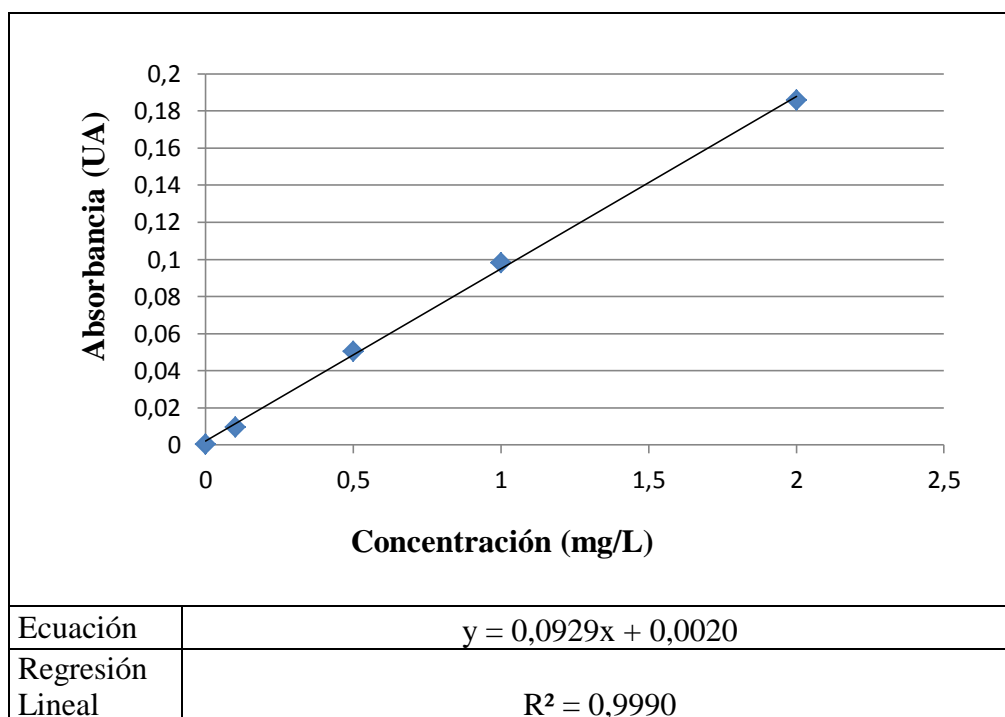
**Figura 3.7. Gradiente de distribución de níquel en suelos de San Alfonso**

A continuación se presentan los resultados de los controles de calidad a los que se sometió la determinación de níquel:

**Curva de calibración.-** Para la construcción de la curva se utilizaron 4 soluciones patrón y un blanco de ácido nítrico al 0,15 % que se detallan en la Tabla 3.15., y en la Figura 3.8. se observa la curva de calibración con su ecuación y coeficiente de regresión lineal correspondientes.

**Tabla 3.15. Soluciones patrón para la construcción de la curva de calibración de níquel**

<b>Solución Patrón</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Absorbancia (UA)</b>
blanco	0,00	0,0004
1	0,10	0,0097
2	0,50	0,0505
3	1,00	0,0981
4	2,00	0,1857



**Figura 3.8. Curva de calibración para Ni**

**Porcentaje de recuperación de PQ y MRC.-** Se debe calcular el porcentaje de recuperación según la ecuación 2.8., los límites comprendidos entre el 90 y 110 % se



detallan en las Tablas 3.16. y 3.17., además en la Tabla 3.17., se detallan también los límites establecidos por el certificado del material de referencia, (PALs).

**Tabla 3.16. Porcentaje de recuperación de níquel en el patrón químico de 1,00 mg/L**

A (mg/L)	B (mg/L)	Porcentaje de recuperación (%)	90 - 110 % (mg/L)	Criterio de aceptación
1,00	0,98	98	0,90 - 1,10	Aprobado

A= Valor teórico, B= Valor experimental

**Tabla 3.17. Porcentaje de recuperación de níquel en el material de referencia certificado**

Repeticiones	A (mg/kg)	B (mg/kg)	Porcentaje de Recuperación (%)	90 - 110 % (mg/kg)	PALs (mg/kg)	Criterio de aceptación
1	74,6	69,8	94	67,1 - 82,1	60,2 - 89,0	Aprobado
2	74,6	70,3	94	67,1 - 82,1	60,2 - 89,0	Aprobado

A = Valor certificado Method 3051 HNO<sub>3</sub> (Anexo 8), B= Valor experimental

PALs = The Performance Acceptance Limits, Method 3051 HNO<sub>3</sub> (Anexo 8)

**Blancos de digestión.-** En la Tabla 3.18., se describe los resultados para los blancos de digestión en las lecturas de Ni.

**Tabla 3.18. Resultados de los blancos de digestión para Ni**

Repeticiones	Resultado (mg/L)	Criterio de aceptación
1	< 0,10	Aprobado
2	< 0,10	Aprobado
3	< 0,10	Aprobado

### 3.2.4. Hierro

Este elemento está en cuarto lugar de abundancia en la corteza terrestre y no se considera un metal pesado; concentraciones altas de hierro no identifican una contaminación ambiental, la finalidad de determinar su concentración en las muestras es calcular los factores de enriquecimiento. Los resultados finales se encuentran en la Tabla 3.19. y el gradiente de distribución de hierro se observa en la Figura 3.9.

En el Anexo 7 se muestran todas las lecturas del equipo con sus resultados finales. Un ejemplo de la utilización de la fórmula 2.7. para la determinación de hierro se explica a continuación.

Datos:

Lote: 9

Lectura del equipo, A: 268,976 mg/L

Muestra: C

Volumen de aforo,  $B$ : 0,025 L

Peso de la muestra,  $W$ :  $5,020 \times 10^{-4}$  kg

Cálculos:

$$\text{mg/kg de hierro en la muestra} = \frac{A \times B}{W} \quad (2.7.)$$

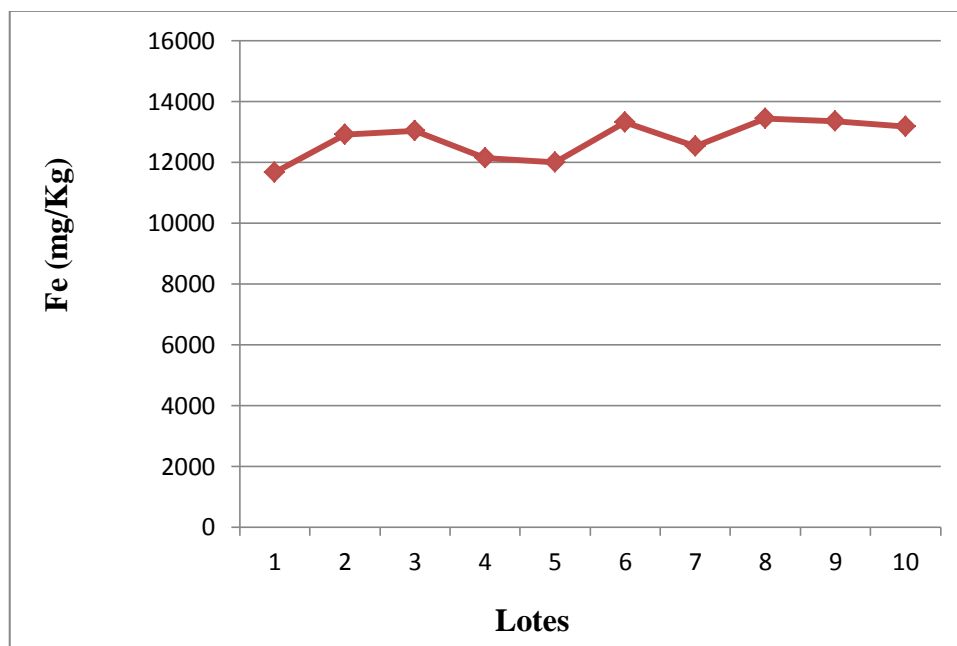
$$\text{mg/kg de hierro en la muestra} = \frac{268,976 \text{ mg/L} \times 0,025 \text{ L}}{5,020 \times 10^{-4} \text{ kg}}$$

mg/kg de hierro = 13395

**Tabla 3.19. Determinación de Hierro**

Lote	Muestras			Promedio (mg/kg)	Desviación estándar (mg/kg)	%CV
	A (mg/kg)	B (mg/kg)	C (mg/kg)			
1	13579	8686	12749	11672	2619	22,4
2	15920	11618	11212	12917	2609	20,2
3	13743	12241	13108	13030	754	5,8
4	11878	11595	12927	12133	702	5,8
5	11258	11290	13462	12003	1263	10,5
6	12906	13954	13080	13313	561	4,2
7	12915	12281	12365	12520	344	2,8
8	13583	13029	13717	13443	365	2,7
9	13204	13433	13395	13344	123	0,9
10	12996	13705	12813	13171	471	3,6

En la Figura 3.9. se observa un gradiente de concentración aproximadamente constante para hierro en los lotes analizados.



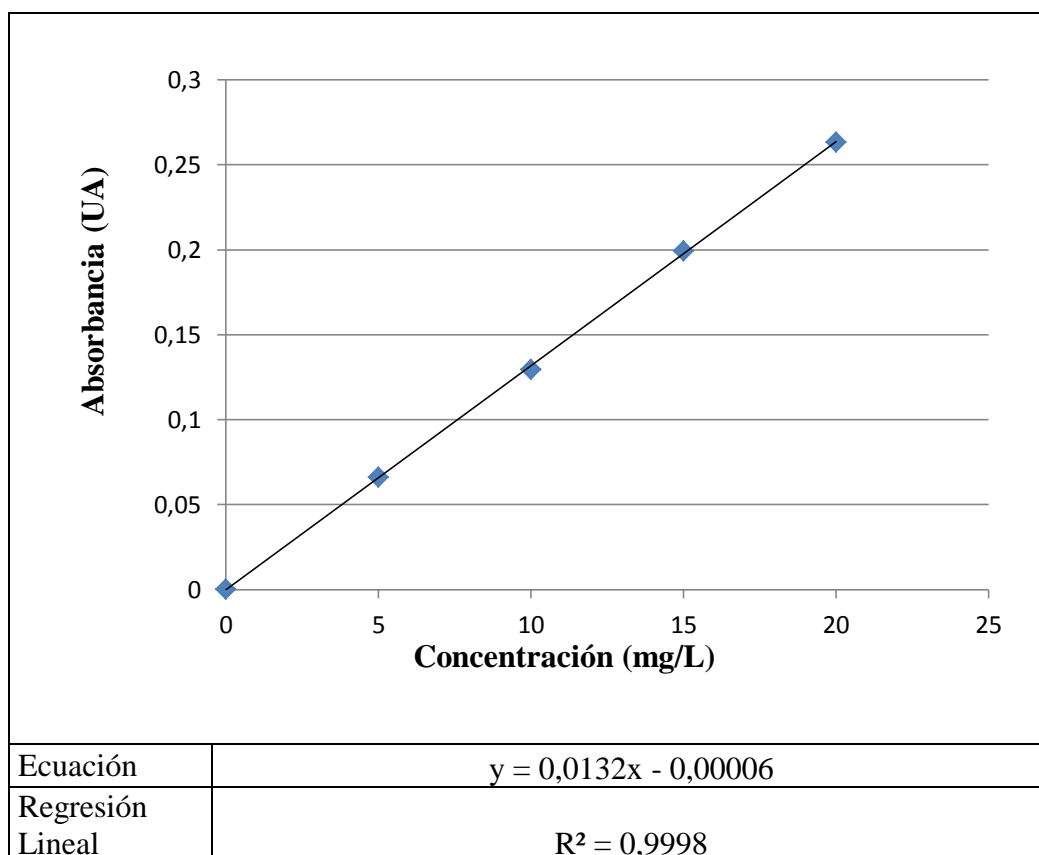
**Figura 3.9. Gradiente de distribución de hierro en suelos de San Alfonso**

A continuación se presentan los resultados de los controles de calidad a los que se sometió la determinación de hierro:

**Curva de calibración.-** Para la construcción de la curva se utilizaron 4 soluciones patrón y un blanco de ácido nítrico diluido 0.15 % que se detallan en la Tabla 3.20., y en la Figura 3.10. se observa la curva de calibración con su ecuación y coeficiente de regresión lineal.

**Tabla 3.20. Soluciones patrón para la construcción de la curva de calibración de hierro**

<b>Solución Patrón</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>	<b>Absorbancia (UA)</b>
blanco	0,00	0,0003
1	5.00	0,0663
2	10.00	0,1296
3	15.00	0,1992
4	20.00	0,2634



**Figura 3.10. Curva de calibración para hierro**

**Porcentaje de recuperación de PQ y MRC.-** Se debe calcular el porcentaje de recuperación según la ecuación 2.8., los límites comprendidos entre el 90 y 110 % se detallan en la Tabla 3.21.; en la Tabla 3.22., se detallan los límites establecidos por el certificado del material de referencia, (PALs).

**Tabla 3.21. Porcentaje de recuperación de hierro en el patrón químico de 10,0 mg/L**

A (mg/L)	B (mg/L)	Porcentaje de recuperación (%)	90 - 110 % (mg/L)	Criterio de aceptación
10,00	9,87	99	9,00 - 11,00	Aprobado

A= Valor teórico, B= Valor experimental

**Tabla 3.22. Porcentaje de recuperación de hierro en el material de referencia certificado**

Repeticiones	A (mg/kg)	B (mg/kg)	Porcentaje de Recuperación (%)	PALs (mg/kg)	Criterio de aceptación
1	10900	14296	131	6030 - 15800	Aprobado
2	10900	13648	125	6030 - 15800	Aprobado

A = Valor certificado Method 3051 HNO<sub>3</sub> (Anexo 8), B= Valor experimental

PALs = The Performance Acceptance Limits, Method 3051 HNO<sub>3</sub> (Anexo 8)

Según el certificado del MRC (Anexo 8) este parámetro es un elemento nativo de la matriz y se encuentra en altas concentraciones en el suelo sin fortificar. Métodos de digestión como el EPA 3051, normalmente no disuelven elementos ligados en las estructuras de los silicatos y las recuperaciones pueden estar fuera del 90 al 110 %, sin embargo los resultados se encuentran dentro de los límites de aceptación (PALs). Por lo tanto se acepta los resultados de los MRCs como controles para hierro.

**Blancos de digestión.-** En la Tabla 3.23., se muestran los resultados para los blancos de digestión en las lecturas de hierro.

**Tabla 3.23. Resultados de los blancos de digestión para hierro**

Repeticiones	Resultado (mg/L)	Criterio de aceptación
1	< 5,00	Aprobado
2	< 5,00	Aprobado
3	< 5,00	Aprobado

### 3.3. RESULTADOS DE LOS FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO E ÍNDICES DE GEOACUMULACIÓN

#### 3.3.1. Factores de enriquecimiento de plomo

A partir de la ecuación 2.9. y utilizando la Tabla 1.5. se presentan los resultados para plomo, los cuales se detallan en la Tabla 3.24. Todos los lotes indican una fuente adicional de enriquecimiento a la de la roca madre.

**Tabla 3.24. Factores de enriquecimiento de plomo en San Alfonso**

Lote	Pb mg/kg	FE	Origen del elemento
1	24,09	10,3	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
2	33,28	12,9	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
3	26,78	10,3	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
4	26,76	11,0	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
5	29,62	12,3	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
6	27,35	10,3	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
7	26,54	10,6	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
8	29,24	10,9	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
9	26,71	10,0	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
10	29,77	11,3	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre

### 3.3.2. Factores de enriquecimiento de cadmio

Según la Tabla 3.25. el 70 % de los lotes indican un alto enriquecimiento y muestran que existe una grave contaminación de origen antropogénico. Los lotes 6, 8 y 9 se encuentran moderadamente enriquecidos, no obstante, muy cerca del umbral superior.

**Tabla 3.25. Factores de enriquecimiento de cadmio en San Alfonso**

<b>Lote</b>	<b>Cd mg/kg</b>	<b>FE</b>	<b>Origen del elemento</b>
1	1,23	526,1	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico
2	1,46	563,3	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico
3	1,38	527,7	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico
4	1,31	538,5	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico
5	1,36	568,1	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico
6	1,29	484,8	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
7	1,29	515,9	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico
8	1,33	494,3	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
9	1,33	497,8	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre
10	1,37	520,3	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico



### 3.3.3. Factores de enriquecimiento de níquel

En la Tabla 3.26. se indica que todos los lotes presentan un enriquecimiento de níquel proveniente de la roca madre. Aquí se evidencia una discrepancia con la legislación ambiental ecuatoriana ya que si aceptáramos estrictamente el valor máximo permisible de 50 mg/kg para suelos que requieren remediación, el lote 3 se encontraría contaminado a tal punto de necesitar restauración, lo que no se entiende de la misma manera de acuerdo al factor de enriquecimiento de este metal en la zona por ser geológicamente más abundante. La causa posible de que dicho valor máximo conste en la Legislación es que el TULAS es una adaptación de legislaciones de otros países y no existen estudios que determinen el valor de fondo de níquel en la zona.

**Tabla 3.26. Factores de enriquecimiento de níquel en San Alfonso**

<b>Lote</b>	<b>Ni mg/kg</b>	<b>FE</b>	<b>Origen del elemento</b>
1	48,61	2,6	De la roca madre
2	41,04	2,0	De la roca madre
3	55,47	2,7	De la roca madre
4	35,79	1,8	De la roca madre
5	32,75	1,7	De la roca madre
6	22,60	1,1	De la roca madre
7	25,55	1,3	De la roca madre
8	21,19	1,0	De la roca madre
9	20,05	0,9	De la roca madre
10	19,41	0,9	De la roca madre

### 3.3.4. Índices de geoacumulación de plomo

Los lotes 2, 5, 8 y 10 tienen un grado de contaminación moderado hacia el ambiente edáfico por los resultados obtenidos en la Tabla 3.27., mientras que todos los demás lotes se encuentran en el grado de no contaminado a moderadamente contaminado. La contaminación por plomo en San Alfonso llega a una escala moderada y en complemento con los FE se demuestra que se debe a un enriquecimiento adicional a la de la roca madre, que puede ser de fuentes antropogénicas como el almacenamiento y fundición de chatarra. El lote 2 es el más contaminado por plomo de todos los lotes, ya que presenta los valores más altos de FE e Igeo.

**Tabla 3.27. Índices de geoacumulación de plomo en San Alfonso**

<b>Lote</b>	<b>Pb mg/kg</b>	<b>Igeo</b>	<b>Grado de contaminación</b>
1	24,09	0,7	No contaminado a moderadamente contaminado
2	33,28	1,1	Moderadamente contaminado
3	26,78	0,8	No contaminado a moderadamente contaminado
4	26,76	0,8	No contaminado a moderadamente contaminado
5	29,62	1,0	Moderadamente contaminado
6	27,35	0,9	No contaminado a moderadamente contaminado
7	26,54	0,8	No contaminado a moderadamente contaminado
8	29,24	1,0	Moderadamente contaminado
9	26,71	0,8	No contaminado a moderadamente contaminado
10	29,77	1,0	Moderadamente contaminado

### 3.3.5. Índices de geoacumulación de cadmio

El cadmio, debido a sus Igeo (Tabla 3.28.), es considerado extremadamente contaminante en el ambiente edáfico. Sin embargo, las concentraciones en las muestras, como se mencionó anteriormente, no sobrepasan los 2 mg/kg considerado como valor máximo permisible según el TULAS y no necesitarían remediación. Nuevamente esta es una discrepancia para un elemento que es poco abundante en la corteza terrestre en comparación con otros y que en esta zona tiene el mayor grado de contaminación según los índices de geoacumulación. Además, en relación a los FE, éstos revelan que la contaminación se debe a fuentes antropogénicas.

**Tabla 3.28. Índices de geoacumulación de cadmio en San Alfonso**

<b>Lote</b>	<b>Cd mg/Kg</b>	<b>Igeo</b>	<b>Grado de contaminación</b>
1	1,23	6,4	Extremadamente contaminado
2	1,46	6,6	Extremadamente contaminado
3	1,38	6,5	Extremadamente contaminado
4	1,31	6,4	Extremadamente contaminado
5	1,36	6,5	Extremadamente contaminado
6	1,29	6,4	Extremadamente contaminado
7	1,29	6,4	Extremadamente contaminado
8	1,33	6,5	Extremadamente contaminado
9	1,33	6,5	Extremadamente contaminado
10	1,37	6,5	Extremadamente contaminado

### 3.3.6. Índices de geoacumulación de níquel

Los Igeo de níquel según la Tabla 3.29., determinan a este elemento como no contaminante en la zona de San Alfonso. La razón es que el níquel es relativamente más abundante que

el plomo y el cadmio en la corteza terrestre; sin embargo, el criterio de calidad que establece el TULAS es menor para níquel que para plomo, lo mismo sucede con los valores máximos permisibles en suelos agrícolas que requieren remediación.

**Tabla 3.29. Índices de geoacumulación de níquel en San Alfonso**

<b>Lote</b>	<b>Ni mg/Kg</b>	<b>Igeo</b>	<b>Grado de contaminación</b>
1	48,61	< 0	No contaminado
2	41,04	< 0	No contaminado
3	55,47	< 0	No contaminado
4	35,79	< 0	No contaminado
5	32,75	< 0	No contaminado
6	22,60	< 0	No contaminado
7	25,55	< 0	No contaminado
8	21,19	< 0	No contaminado
9	20,05	< 0	No contaminado
10	19,41	< 0	No contaminado

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1. CONCLUSIONES**

- A través de la determinación de la concentración de plomo en diez lotes de suelo agrícola en el Sector de San Alfonso en Machachi se concluye que se mantiene un gradiente de concentración constante con una pequeña elevación en el lote número dos. El 90 % de los lotes sobrepasa los 25 mg/kg, criterio de calidad para este elemento en el suelo según el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente del Ecuador (TULAS). Se debe resaltar que ninguna de las muestras superó los 100 mg/kg de concentración, valor máximo permisible establecido para suelos contaminados de uso agrícola y que requieran remediación.
- La concentración de cadmio en los diez lotes es casi el triple del criterio de calidad (0,5 mg/kg) descrito en el TULAS. De igual manera el gradiente de concentración se mantiene constante con una similar elevación en el lote dos como en el caso de plomo. Los valores de concentración en todas las muestras no sobrepasan el valor máximo permisible de 2 mg/kg.

- El níquel por su lado, en nueve de los diez lotes presenta concentraciones mayores al valor de fondo de 20 mg/Kg, mientras que el lote tres sobrepasa el LMP de 50 mg/Kg por lo que según el TULAS requeriría remediación. El gradiente de concentración es decreciente conforme los lotes se van alejando de la chatarra.
- En general, el cálculo de factores de enriquecimiento de plomo y cadmio demuestran que existe una elevación en la concentración de estos metales pesados. Los FE para plomo se encuentran en el rango de 10 a 500 que se entiende como un enriquecimiento moderado e indica la existencia de otra fuente de enriquecimiento adicional a la de la roca madre. Para el cadmio el 70 % de los lotes tiene valores de FE mayores a 500, indican un alto enriquecimiento y demuestran que existe una grave contaminación de origen antropogénico, aunque el otro 30 % de los lotes que se encuentra en el rango inferior está muy cerca al umbral máximo (500) por lo que se concluye que el cadmio provoca una zona extremadamente contaminada.
- El 100 % de los lotes tiene factores de enriquecimiento de níquel en el rango de 1 a 10, que indica que el origen del elemento es proveniente de la roca madre.
- Los índices de geoacumulación para plomo revelan que el 40 % de los lotes tiene un grado de contaminación moderado por cuanto los valores se encuentran en un rango de 1 a 2.
- Para cadmio el 100 % de los lotes manifiestan un grado de contaminación extremo, ya que los índices de geoacumulación tienen valores mayores que 6.

- En el caso del níquel no se evidencia una contaminación debido a que tiene valores de índices de geoacumulación menores que cero.
- En cuanto a los análisis de las propiedades físicas con variables discretas como son: color y textura, se determinó que todas las muestras presentan un color negro y una textura franco-arcillo-limosa. Lo que tiene concordancia con las características descritas en el mapa general de suelos donde se indica que el Cantón Mejía, específicamente el sector San Alfonso, posee un tipo de suelo perteneciente a los Mollisoles, que se encuentra en un clima húmedo entre frío y templado.
- De igual forma el pH en las muestras que tiene un rango entre ligeramente ácido y neutro, concuerda como característica de los Mollisoles.
- La humedad del terreno bordea el 25 % lo que es normal para un tipo de suelo no árido y con lluvias constantes.
- El contenido de materia orgánica está ligeramente por encima del 5 % que es el valor referencial, la causa es que todas las personas responsables de cultivar el suelo en esta área utilizan abono orgánico como fertilizante natural, además existen criaderos de animales muy cerca de los cultivos.
- Con los datos del color, textura y pH se ratifica el tipo de suelo en esta zona que corresponde a los Mollisoles, de esta manera se puede realizar una suposición de la capacidad de intercambio catiónico que posee el terreno, haciendo referencia a la

Tabla 1.4. Los Mollisoles están en tercer lugar de los suelos con mayor CIC; por ende estos suelos, contaminados con metales pesados (cadmio y plomo), se convierten en portadores de los contaminantes hacia los cultivos y consumidores de los cultivos.

- Actualmente el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ecuador se encuentra en revisión por algunas inconsistencias relacionadas con los valores establecidos como criterios de calidad y máximos permisibles para ciertos contaminantes, en el caso de níquel se debería tomar en cuenta su abundancia o realizar más estudios para establecer valores consistentes.

#### **4.2. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar análisis de metales pesados a través de la prueba de lixiviación en los suelos de San Alfonso o en el nivel freático que es por donde pasa el agua subterránea y de este modo evaluar un posible enriquecimiento a otros sectores alrededor del área en estudio.
- En el proceso de la fundición de la chatarra es posible generar muchos otros subproductos peligrosos además de los metales pesados, de esta forma se recomienda realizar análisis en las diferentes matrices (agua, suelo y aire) de dioxinas y furanos, que son las sustancias más tóxicas que se pueden emitir al ambiente.



- Se debe efectuar una caracterización de las escorias resultantes de la fundición de metales y que son desechadas en las calles como rellenos.
- Continuar con monitoreos periódicos de los recursos aire, agua y suelo a los alrededores de la planta de fundición de metales.
- Realizar análisis de metales pesados en los diferentes tipos de cultivos para observar si existe contaminación en los productos que se expenden en los mercados de la zona y sus alrededores.
- Se debe promover campañas de capacitación al personal informal de reciclaje de chatarra para que adopten técnicas adecuadas de limpieza.
- Se recomienda no usar la malla de 10 mesh (2mm) luego de la disminución de partícula con la licuadora, ya que se observó que ésta retenía algunas arenas en forma desigual en cada muestra. Es muy probable que se retuviera también metales pesados ligados a estas arenas y debido a esto el coeficiente de variación se elevó en algunos lotes.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Licencia de YouTube estándar, nombre de usuario: jonathan7b7n7s, (2009). Adelca. Responsabilidad Social, [http://www.youtube.com/watch?v=ahoTP\\_ugnR0](http://www.youtube.com/watch?v=ahoTP_ugnR0), 08 de diciembre de 2012.
- [2] Simon, P., Upside Down World (2006), El Valle Ecológico de Machachi: el "último valle agrícola", ¿el valle de la chatarra?, <http://upsidedownworld.org/main/en-espatopmenu-81/419-el-valle-ecolo-de-machachi-el-qmo-valle-agrlaq-iel-valle-de-la-chatarra>, 11 de enero de 2011.
- [3] Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente del Ecuador (TULAS), Libro VI, Anexo 2. Recurso Suelo, Ecuador, 2012.
- [4] Del Águila, P., Lugo de la Fuente, J., Vaca, R. (2005). Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma, *Ciencia Ergo Sum*, Universidad Autónoma del Estado de México, 12, pp 155-161.
- [5] Kalipedia, Formación y tipos de suelos, [http://uy.kalipedia.com/kalipediamedia/geografia/media/200807/31/geouruguay/20080731klpgeogur\\_5\\_Ges\\_SCO.png](http://uy.kalipedia.com/kalipediamedia/geografia/media/200807/31/geouruguay/20080731klpgeogur_5_Ges_SCO.png), 09 de marzo de 2010.

- [6] Vega de Kuyper, J. (2002). *Química del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales*, 1ª edición, Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- [7] Espinosa J. (1999). *Fundamentos de Química de Suelos*, 1ª edición, International Plant Nutrition Institute, Quito.
- [8] Chávez, F., (2011). *Determinación multielemental de macro y micronutrientes catiónicos en suelos por ICP-OES*, Disertación de Licenciatura en Ciencias Químicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.
- [9] Vallejo, L., Moldanado, E., ISRIC World Soil Information (1986), Mapa General de Suelos del Ecuador, <http://library.wur.nl/isric/index2.html?url=http://library.wur.nl/WebQuery/isric/17544>, 15 de diciembre de 2011.
- [10] Radojevic, M., Bashkin, V. (2006). *Practical Environmental Analysis*, 2ª edición, The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- [11] Garrison, S. (1989). *The Chemistry of Soils*. 1ª edición, Oxford University Press, Inc., New York.
- [12] Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe, (2005). *Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos*. Montevideo, Uruguay.

- [13] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, (2011). *Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación*. Châtelaine, Suiza.
- [14] Cotton, F. y Wilkinson G. (1993). *Química Inorgánica Avanzada*, 4ª edición, Limusa Noriega Editores, México D.F.
- [15] Valenzuela, C. (1999). *Introducción a la Química Inorgánica*, 2ª edición, McGraw-Hill, Madrid.
- [16] Ubilus, J. (2003). *Estudio sobre la presencia de plomo en el medio ambiente de Talara en el año 2003*. Trabajo Monográfico (Ingeniero Químico), Universidad Mayor de San Marcos, Perú.
- [17] Lenntech, (2011). Cadmio, <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>, 04 de agosto de 2011.
- [18] Akoto, O., Ephraim, J., Darko, G. (2008). Heavy Metals Pollution in Surface Soils in the Vicinity of Abundant Railway Servicing Workshop in Kumasi, Ghana, *International Journal of Environmental Research*, Universidad de Theran, 2, pp359 - 364.
- [19] Carter, M. (1993). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 1ª edición, Lewis Publishers, Boca Ratón.

- [20] Milford, M. (1997). *Soils and Soils Science: Laboratory exercises*, 4ª edición, Texas A&M University, Kendall/Hunt Publishing Company, Iowa.
- [21] American Society for Testing Materials, ASTM International, (2001). *D4959-07 Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil By Direct Heating*. USA.
- [22] Environmental Protection Agency, EPA, (2004). *9045 D Soil and Waste pH*. USA.
- [23] American Society for Testing Materials, ASTM International, (1988). *D2974 Ash Content and Organic Matter Content*. USA.
- [24] Environmental Protection Agency, EPA, (2007). *3051A Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils*. USA.
- [25] Skoog, D., (2001). *Principios de Análisis Instrumental*, 5ª edición, McGraw-Hill, Madrid.
- [26] Environmental Protection Agency, EPA, (1992). *7000A Atomic Absorption Methods*. USA.
- [27] Palma, I., Farran, A., Cantós, D. (2008). *Tablas de composición de alimentos por medidas caseras de consumo habitual en España*, 1ª edición, McGraw-Hill, Madrid.

[28] Rivera, C. y Rodríguez M. (2010). *Uso de la ecuación de Horwitz en laboratorios de ensayos NMX-EC-17025-IMNC-2006*, Centro Nacional de Metrología, Simposio de Metrología 2010, Querétaro, Qro., México, pp1-8.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### FOTOGRAFÍAS

#### Reconocimiento del lugar de muestreo





## Muestreo



## Manejo y preparación de las muestras





## Secado y reducción del tamaño de partícula de las muestras de suelo



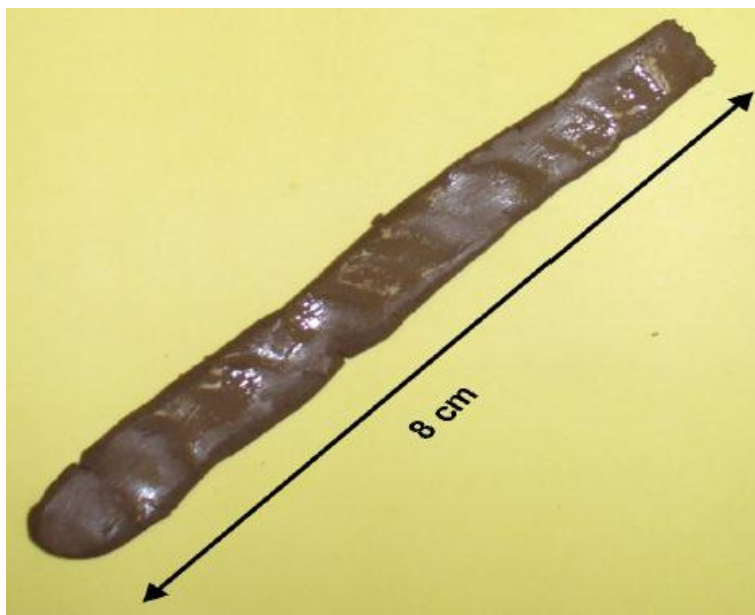
## Tamizado de las muestras



### Determinación de color y textura



[20]



[20]



## Determinación de Humedad



## Determinación de pH



## Determinación de materia orgánica





## Extracción de metales (Pb, Cd, Ni, y Fe) por digestión ácida asistida con microondas



## Determinación de Pb, Cd, Ni y Fe por AA



## **ANEXO 2**

### **CONTENIDO DE HUMEDAD**

Lote	Muestra	Peso de la muestra $M_1$ (g)	Peso final (g)	Peso cápsula (g)	Peso muestra seca, $M_2^*$ (g)	% de humedad**
1	A	10,0186	45,2471	37,7826	7,4645	25,49
	B	10,6053	48,1697	40,3387	7,8310	26,16
	C	10,3739	48,4435	40,7172	7,7263	25,52
2	A	10,0519	51,1580	43,7554	7,4026	26,36
	B	10,1820	49,2852	41,8288	7,4564	26,77
	C	10,0938	53,2557	45,8396	7,4161	26,53
3	A	10,3657	48,2641	40,5912	7,6729	25,98
	B	10,1168	50,5593	43,1021	7,4572	26,29
	C	10,0647	46,5923	39,1348	7,4575	25,90
4	A	10,4556	45,1326	37,2962	7,8364	25,05
	B	10,0336	45,6236	38,0829	7,5407	24,85
	C	10,0231	45,9209	38,3719	7,5490	24,68
5	A	10,4886	50,2924	42,0433	8,2491	21,35
	B	10,2738	39,6470	31,6804	7,9666	22,46
	C	10,3476	57,7811	49,7580	8,0231	22,46
6	A	10,2282	45,4428	37,6702	7,7726	24,01
	B	10,2176	48,9852	41,3754	7,6098	25,52
	C	10,2108	65,0398	57,2698	7,7700	23,90
7	A	10,7274	47,5890	39,4047	8,1843	23,71
	B	10,0334	50,5981	42,9300	7,6681	23,57
	C	10,5461	51,3436	43,1911	8,1525	22,70
8	A	10,0702	51,4574	43,9687	7,4887	25,64
	B	10,1441	48,0730	40,3941	7,6789	24,30
	C	10,0899	50,2829	42,6444	7,6385	24,30
9	A	10,1082	54,0086	46,2927	7,7159	23,67
	B	10,0540	42,3338	34,7435	7,5903	24,50
	C	10,1323	48,6529	41,0249	7,6280	24,72
10	A	10,3841	46,7942	38,9599	7,8343	24,55
	B	10,2819	53,0074	45,2908	7,7166	24,95
	C	10,3661	47,1341	39,3033	7,8308	24,46

\*Peso de la muestra seca,  $M_2 = \text{Peso final (g)} - \text{Peso de la cápsula (g)}$

\*\*Contenido de humedad (%) =  $100 \times \frac{(M_1 - M_2)}{M_1}$

### **ANEXO 3**

#### **CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA**

Lote	Muestra	Peso muestra (g)	Peso crisol, c (g)	Peso crisol más muestra, b (g)*	Peso final, a (g)	% cenizas**	% MO***
1	A	1,9551	22,7149	24,6700	24,5180	92,2	7,8
	B	1,9468	21,8536	23,8004	23,6530	92,4	7,6
	C	1,9529	24,3712	26,3241	26,1700	92,1	7,9
2	A	2,0391	22,7432	24,7823	24,6299	92,5	7,5
	B	1,9491	19,8483	21,7974	21,6411	92,0	8,0
	C	1,9579	20,9497	22,9076	22,7577	92,3	7,7
3	A	1,9511	20,9717	22,9228	22,7857	93,0	7,0
	B	1,9579	18,1729	20,1308	19,9891	92,8	7,2
	C	1,9546	24,1500	26,1046	25,9630	92,8	7,2
4	A	1,9486	23,3119	25,2605	25,1233	93,0	7,0
	B	1,9665	17,6518	19,6183	19,4793	92,9	7,1
	C	1,9650	26,8811	28,8461	28,7073	92,9	7,1
5	A	2,0088	17,6518	19,6606	19,5433	94,2	5,8
	B	2,1192	20,9497	23,0689	22,9447	94,1	5,9
	C	2,1603	19,8483	22,0086	21,8870	94,4	5,6
6	A	2,0052	20,9717	22,9769	22,8445	93,4	6,6
	B	2,0143	18,1729	20,1872	20,0564	93,5	6,5
	C	2,0188	26,8811	28,8999	28,7590	93,0	7,0
7	A	2,0300	21,8536	23,8836	23,7442	93,1	6,9
	B	2,0204	24,3712	26,3916	26,2502	93,0	7,0
	C	2,0177	23,3119	25,3296	25,1895	93,1	6,9
8	A	2,0007	22,7129	24,7136	24,5872	93,7	6,3
	B	2,0789	20,9455	23,0244	22,8898	93,5	6,5
	C	2,0027	18,1724	20,1751	20,0438	93,4	6,6
9	A	2,0017	17,6491	19,6508	19,5135	93,1	6,9
	B	2,0067	24,3702	26,3769	26,2491	93,6	6,4
	C	2,0436	21,8526	23,8962	23,7602	93,3	6,7
10	A	2,0136	23,3114	25,3250	25,1843	93,0	7,0
	B	2,0916	20,9710	23,0626	22,9109	92,7	7,3
	C	2,0029	24,1488	26,1517	26,0073	92,8	7,2

\*b = c (g) + peso de la muestra (g)

\*\*Contenido de ceniza (%) =  $[(a - c)/(b - c)] \times 100$

\*\*\*Materia orgánica (%) =  $100 - \%$  contenido mineral (ceniza)

## **ANEXO 4**

### **CONTENIDO DE PLOMO**

Lote	Muestras	Peso, $W$ (x $10^{-4}$ kg)	V. de aforo, $B$ (L)	Lectura Pb, $A$ (mg/L)	Pb* (mg/kg)
1	A	5,080	0,025	0,522	25,69
	B	5,086	0,025	0,404	19,86
	C	5,099	0,025	0,545	26,72
2	A	5,044	0,025	0,546	27,06
	B	5,149	0,025	0,624	30,30
	C	5,090	0,025	0,865	42,49
3	A	5,029	0,025	0,522	25,95
	B	5,042	0,025	0,527	26,13
	C	5,018	0,025	0,567	28,25
4	A	5,030	0,025	0,538	26,74
	B	5,074	0,025	0,521	25,67
	C	5,014	0,025	0,559	27,87
5	A	5,093	0,025	0,643	31,56
	B	5,097	0,025	0,581	28,50
	C	5,025	0,025	0,579	28,81
6	A	5,006	0,025	0,513	25,62
	B	5,094	0,025	0,578	28,37
	C	5,007	0,025	0,562	28,06
7	A	5,160	0,025	0,543	26,31
	B	5,111	0,025	0,528	25,83
	C	5,022	0,025	0,552	27,48
8	A	5,111	0,025	0,525	25,68
	B	5,084	0,025	0,552	27,14
	C	5,045	0,025	0,704	34,89
9	A	5,170	0,025	0,533	25,77
	B	5,060	0,025	0,542	26,78
	C	5,020	0,025	0,554	27,59
10	A	5,100	0,025	0,667	32,70
	B	5,030	0,025	0,568	28,23
	C	5,013	0,025	0,569	28,38

MRC	Peso, $W$ (x $10^{-4}$ kg)	V. de aforo, $B$ (L)	Lectura Pb, $A$ (mg/L)	Pb* (mg/kg)
1	5,013	0,025	1,684	84,0
2	5,084	0,025	1,661	81,7

$$\text{*mg/kg de Pb en la muestra} = \frac{A \times B}{W}$$



## **ANEXO 5**

### **CONTENIDO DE CADMIO**

Lote	Muestras	Peso, $W$ (x $10^{-4}$ kg)	V. de aforo, $B$ (L)	Lectura Cd, $A$ (mg/L)	Cd* (mg/kg)
1	A	5,080	0,025	0,026	1,28
	B	5,086	0,025	0,020	0,98
	C	5,099	0,025	0,029	1,42
2	A	5,044	0,025	0,027	1,34
	B	5,149	0,025	0,031	1,51
	C	5,090	0,025	0,031	1,52
3	A	5,029	0,025	0,026	1,29
	B	5,042	0,025	0,027	1,34
	C	5,018	0,025	0,030	1,49
4	A	5,030	0,025	0,025	1,24
	B	5,074	0,025	0,025	1,23
	C	5,014	0,025	0,029	1,45
5	A	5,093	0,025	0,029	1,42
	B	5,097	0,025	0,027	1,32
	C	5,025	0,025	0,027	1,34
6	A	5,006	0,025	0,025	1,25
	B	5,094	0,025	0,026	1,28
	C	5,007	0,025	0,027	1,35
7	A	5,160	0,025	0,026	1,26
	B	5,111	0,025	0,026	1,27
	C	5,022	0,025	0,027	1,34
8	A	5,111	0,025	0,026	1,27
	B	5,084	0,025	0,027	1,33
	C	5,045	0,025	0,028	1,39
9	A	5,170	0,025	0,026	1,26
	B	5,060	0,025	0,027	1,33
	C	5,020	0,025	0,028	1,39
10	A	5,100	0,025	0,027	1,32
	B	5,030	0,025	0,028	1,39
	C	5,013	0,025	0,028	1,40

MRC	Peso, $W$ (x $10^{-4}$ kg)	V. de aforo, $B$ (L)	Lectura Cd, $A$ (mg/L)	Cd* (mg/kg)
1	5,013	0,025	5,084	253,5
2	5,084	0,025	5,045	248,1

Las lecturas del equipo para los materiales de referencia se encuentran multiplicadas por un factor de dilución de 100 veces.

$$\text{*mg/kg de Cd en la muestra} = \frac{A \times B}{W}$$

## **ANEXO 6**

### **CONTENIDO DE NÍQUEL**

Lote	Muestras	Peso, $W$ (x $10^{-4}$ kg)	V. de aforo, $B$ (L)	Lectura Ni, $A$ (mg/L)	Ni* (mg/kg)
1	A	5,080	0,025	1,113	54,77
	B	5,086	0,025	1,136	55,84
	C	5,099	0,025	0,718	35,20
2	A	5,044	0,025	1,113	55,16
	B	5,149	0,025	0,541	26,27
	C	5,090	0,025	0,849	41,70
3	A	5,029	0,025	0,976	48,52
	B	5,042	0,025	1,218	60,39
	C	5,018	0,025	1,154	57,49
4	A	5,030	0,025	0,563	27,98
	B	5,074	0,025	0,722	35,57
	C	5,014	0,025	0,879	43,83
5	A	5,093	0,025	0,750	36,82
	B	5,097	0,025	0,640	31,39
	C	5,025	0,025	0,604	30,05
6	A	5,006	0,025	0,414	20,68
	B	5,094	0,025	0,429	21,05
	C	5,007	0,025	0,522	26,06
7	A	5,160	0,025	0,437	21,17
	B	5,111	0,025	0,651	31,84
	C	5,022	0,025	0,475	23,65
8	A	5,111	0,025	0,454	22,21
	B	5,084	0,025	0,410	20,16
	C	5,045	0,025	0,428	21,21
9	A	5,170	0,025	0,402	19,44
	B	5,060	0,025	0,424	20,95
	C	5,020	0,025	0,397	19,77
10	A	5,100	0,025	0,402	19,71
	B	5,030	0,025	0,430	21,37
	C	5,013	0,025	0,344	17,16

MRC	Peso, $W$ (x $10^{-4}$ kg)	V. de aforo, $B$ (L)	Lectura Ni, $A$ (mg/L)	Ni* (mg/kg)
1	5,013	0,025	1,400	69,8
2	5,084	0,025	1,430	70,3

$$\text{*mg/kg de Ni en la muestra} = \frac{A \times B}{W}$$

## **ANEXO 7**

### **CONTENIDO DE HIERRO**

Lote	muestras	Peso, $W$ (x $10^{-4}$ kg)	V. de aforo, $B$ (L)	Lectura Fe, $A$ (mg/L)	Fe* (mg/kg)
1	A	5,080	0,025	275,935	13579
	B	5,086	0,025	176,706	8686
	C	5,099	0,025	260,035	12749
2	A	5,044	0,025	321,201	15920
	B	5,149	0,025	239,285	11618
	C	5,090	0,025	228,280	11212
3	A	5,029	0,025	276,446	13743
	B	5,042	0,025	246,880	12241
	C	5,018	0,025	263,096	13108
4	A	5,030	0,025	238,981	11878
	B	5,074	0,025	235,332	11595
	C	5,014	0,025	259,271	12927
5	A	5,093	0,025	229,355	11258
	B	5,097	0,025	230,178	11290
	C	5,025	0,025	270,578	13462
6	A	5,006	0,025	258,426	12906
	B	5,094	0,025	284,321	13954
	C	5,007	0,025	261,974	13080
7	A	5,160	0,025	266,560	12915
	B	5,111	0,025	251,065	12281
	C	5,022	0,025	248,383	12365
8	A	5,111	0,025	277,699	13583
	B	5,084	0,025	264,951	13029
	C	5,045	0,025	276,814	13717
9	A	5,170	0,025	273,058	13204
	B	5,060	0,025	271,887	13433
	C	5,020	0,025	268,976	13395
10	A	5,100	0,025	265,111	12996
	B	5,030	0,025	275,746	13705
	C	5,013	0,025	256,924	12813

MRC	Peso, $W$ (x $10^{-4}$ kg)	V. de aforo, $B$ (mL)	Lectura Fe, $A$ (mg/L)	Fe* (mg/kg)
1	5,013	0,025	286,656	14296
2	5,084	0,025	277,538	13648

Las lecturas del equipo para muestras y MRCs se encuentran multiplicadas por un factor de dilución de 25 veces.

$$\text{*mg/kg de Fe en la muestra} = \frac{A \times B}{W}$$

## **ANEXO 8**

**CERTIFICADO DEL MATERIAL DE REFERENCIA PARA SUELOS, ERA LOT:**

**D039-540**

## PriorityPollutnT™/CLP Inorganic Soils - Microwave Digestions

Lot No. D039540

Method 3051 HNO<sub>3</sub>, HCl

Parameter	Total Concentration <sup>1</sup>	Certified Value <sup>2</sup>	Performance Acceptance Limits™ <sup>3</sup>
<b>TRACE METALS PriorityPollutnT™</b>	<b>mg/Kg</b>	<b>mg/Kg</b>	<b>mg/Kg</b>
(Catalog No. 540)			
Aluminum	55200*	6240	2340 - 10100
Antimony	214	163	80.5 - 246
Arsenic	149	131	97.0 - 165
Barium	782*	135	107 - 163
Beryllium	71.5	65.6	54.4 - 76.8
Boron	114	49.6	29.6 - 69.6
Cadmium	270	256	205 - 307
Calcium	9750*	3480	2490 - 4470
Chromium	111	98.4	75.5 - 121
Cobalt	60.7	44.3	33.4 - 55.2
Copper	72.9	63.4	51.1 - 75.7
Iron	24400*	13000	6030 - 20000
Lead	92.8	77.2	62.6 - 91.8
Magnesium	3780*	2100	1440 - 2760
Manganese	531	254	186 - 322
Mercury	3.74	4.04	2.75 - 5.33
Molybdenum	34.8	31.5	25.3 - 37.7
Nickel	84.7	75.9	61.5 - 90.3
Potassium	32500*	1960	1230 - 2690
Selenium	87.0	80.6	54.3 - 107
Silver	138	120	62.3 - 178
Sodium	14800*	390	213 - 567
Strontium	241	51.0	37.0 - 65.0
Thallium	129	121	88.0 - 154
Tin	118	57.9	33.6 - 82.2
Titanium	3100*	264	17.3 - 511
Vanadium	147	108	74.0 - 142
Zinc	162	141	113 - 169

Method 3051 HNO<sub>3</sub>

Parameter	Total Concentration <sup>1</sup>	Certified Value <sup>2</sup>	Performance Acceptance Limits™ <sup>3</sup>
<b>TRACE METALS PriorityPollutnT™</b>	<b>mg/Kg</b>	<b>mg/Kg</b>	<b>mg/Kg</b>
(Catalog No. 540)			
Aluminum	55200*	5870	2820 - 8920
Antimony	214	26.1	D.L. - 58.1
Arsenic	149	134	95.7 - 172
Barium	782*	143	115 - 171
Beryllium	71.5	67.4	55.0 - 79.8
Boron	114	49.4	27.3 - 71.5
Cadmium	270	255	209 - 301
Calcium	9750*	3490	2820 - 4160
Chromium	111	99.3	79.0 - 120
Cobalt	60.7	45.0	33.7 - 56.3
Copper	72.9	68.0	54.9 - 81.1
Iron	24400*	10900	6030 - 15800
Lead	92.8	77.2	60.7 - 93.7
Magnesium	3780*	1960	1440 - 2470
Manganese	531	249	204 - 294
Mercury	3.74	4.04	2.75 - 5.33
Molybdenum	34.8	27.2	20.9 - 33.5
Nickel	84.7	74.6	60.2 - 89.0
Potassium	32500*	1910	1040 - 2780
Selenium	87.0	78.3	51.3 - 105
Silver	138	42.5	D.L. - 162
Sodium	14800*	383	263 - 503
Strontium	241	52.4	43.2 - 61.6
Thallium	129	125	96.7 - 153
Tin	118	32.3	17.8 - 46.8
Titanium	3100*	227	D.L. - 525
Vanadium	147	104	77.7 - 130
Zinc	162	141	113 - 169





**D.L. = detection limit**

(1) **Total Concentrations** are equal to the digestable background concentrations (determined by data generated internally by ERA, measured using method 3050 HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, and HCl) in the blank soil matrix, plus the amount of each analyte spiked onto the soil. For Trace Metals, the values listed are only "theoretical values" based upon using the methodologies listed. Results obtained using these methods should be compared to the certified values listed.

(2) **Certified Values** are equal to the mean recoveries for each parameter as determined in an interlaboratory round robin study using the digestions and analytical techniques listed. Mercury results were obtained using Cold Vapor Atomic Absorption methodologies. All certified values are based on an "as received" basis, assuming a 100% solids content.

(3) **The Performance Acceptance Limits (PALs™)** are listed as guidelines for acceptable analytical results given the limitations of the USEPA methodologies commonly used to determine these parameters and closely approximate the 95% confidence interval. The PALs™ are based on data generated by your peer laboratories in ERA's Interlab™ programs. If your result falls outside of the PALs™, ERA recommends that you investigate potential sources of error in your preparation and/or analytical procedures. For further technical assistance, call ERA at 1-800-372-0122.

\* These parameters are native matrix elements and are present at high concentrations in the unspiked soil. As methods 3050 and 3051 do not normally dissolve elements bound in silicate structures, the recoveries of these elements will be low relative to the recoveries of the elements that are primarily spiked onto the soil.

**NOTE:** For laboratories that use internal standards in their analysis procedures, the following elements have been measured in this standard at the listed concentrations. (Note: these concentrations are for informational use only and do not represent "Certified Values". Ce - 59.9 mg/Kg; La - 33.5 mg/Kg; Li - 6.84 mg/Kg; Y - 10.6 mg/Kg.)

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**

**SECRETARÍA**

**PARA GRADOS ACADÉMICOS DE LICENCIADOS (TERCER NIVEL)**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN**

Yo, José Luis Quevedo Cazares, C.I. 1717301210, autor del trabajo de graduación intitulado: “Determinación de factores de enriquecimiento e índices de geoacumulación de plomo, cadmio y níquel en suelos agrícolas del sector San Alfonso en Machachi”, previa a la obtención del grado académico de **LICENCIADO EN CIENCIAS QUÍMICAS CON MENCIÓN EN QUÍMICA ANALÍTICA** en la Facultad de **Ciencias Exactas y Naturales**:

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENECYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través del sitio web de la Biblioteca de la PUCE el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de la Universidad.

Quito, 15 de enero de 2013

Sr. José Luis Quevedo Cazares

C.I. 1717301210